



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΔΙΔΑΚΤΙΚΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ : «ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ & ΔΙΚΤΥΑ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη και ανάπτυξη ασύρματου δικτύου τηλεμετρίας»

Ρηνώτας Ευάγγελος
Α.Μ. : ME/08063

Επιβλέπων καθηγητής : Αθανάσιος Κανάτας

Σεπτέμβριος 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στους γρήγορους ρυθμούς ανάπτυξης της τεχνολογίας, πολλές εφαρμογές έχουν συμβάλει πολύ στην απλούστευση των ρυθμών της ζωή μας, όπως τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, τα δίκτυα ασύρματης μετάδοσης. Ένα κλάδος που έχει συμβάλει επίσης, αλλά λίγοι τα γνωρίζουμε είναι και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία τα χρησιμοποιούμε ευρέως σε πολλούς τομείς, όπως είναι τα «έξυπνα κτίρια», στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος, στην ιατρική, σε στρατιωτικές εφαρμογές κ.α. Στο μέλλον τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, πρόκειται να εισχωρήσουν πολύ περισσότερο, απ' ό,τι στο παρόν.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τελευταία αναπτύσσονται ραγδαίως, μιας και τα κυριότερα στοιχεία αυτών είναι: η πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας κατά την διάρκεια λειτουργίας, ο πολύ μεγάλος χρόνος ζωής των πηγών ενέργειας που τα τροφοδοτούν και το κυριότερο, η λειτουργία τους με πολύ λίγη έως καθόλου επιτήρηση αυτών.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να αναπτυχθεί ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, που θα βασίζεται στα ασύρματα αισθητήρια Tmote Sky της εταιρείας Moteln καθώς και μιας εφαρμογής που θα συλλέγει τα δεδομένα από αυτά και παράλληλα θα μπορούμε να τα επεξεργαζόμαστε απομακρυσμένα μέσω του Διαδικτύου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	7
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	7
1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	9
1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	15
1.4 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	19
1.5 ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	21
1.5.1 ΧΡΟΝΟΣ ΖΩΗΣ	21
1.5.2 ΚΑΛΥΨΗ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΙΜΟΤΗΤΑ	22
1.5.3 ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΕΥΚΟΛΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ	22
1.5.4 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΣΦΑΛΜΑΤΑ	23
1.5.5 ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ	23
1.5.6 ΑΣΦΑΛΕΙΑ	24
1.6 ΈΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	25
1.7 ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	29
1.7.1 ΓΕΝΙΚΑ	29
1.7.2 ΑΕΟΝ (ACCURATE PREDICTION OF POWER CONSUMPTION)	30
1.7.3 ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	34
1.7.4 SPOT (SCALABLE POWER OBSERVATION TOOL)	38
1.7.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΟΜΒΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	42
1.7.6 ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΣ ΜΙΑ ΜΟΝΑΔΑ BIT-METER-PER-JOULE	43
2 ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ Ο ΚΟΜΒΟΣ ΜΟΤΕ – IV	45
2.1 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΤΟ ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΤΩΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ	45
2.2 ΠΡΟΤΥΠΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΔΙΕΠΑΦΩΝ	47
2.2.1 ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ	48
2.3 Η ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΤΜΟΤΕ SKY	52
2.3.1 ΒΑΣΙΚΑ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΑ	53
2.3.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ - ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	53
2.3.3 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ	54
2.3.4 ΑΣΥΡΜΑΤΟΣ ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΗΣ	55
2.3.5 Ο ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΚΟΜΒΟΣ	57
2.3.6 ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	59
2.3.7 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ	61
3 ΤΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΙΝΥΟΣ	65
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	65
3.2 Η ΓΛΩΣΣΑ NESC	67
3.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	67
3.2.2 ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΔΙΕΠΑΦΕΣ (COMPONENTS AND INTERFACES)	70
3.3 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΤΙΝΥΟΣ	72

4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	76
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	76
4.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	78
4.2.1 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ	79
4.2.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	79
4.3 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	80
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	83
6 ΕΠΙΛΟΓΟΣ	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	98

Εικόνα 1: Διασπορά αισθητήρων σε ένα πεδίο παρακολούθησης και αποστολή δεδομένων σε ένα σταθμό βάσης.....	10
Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική μονάδας δικτύων αισθητήρων	11
Εικόνα 3: Ασύρματος αισθητήρας τύπου crossbow για την εφαρμογή firementor....	15
Εικόνα 4 Το στρατιωτικό σύστημα υποβήθησης στρατιωτών SaS	17
Εικόνα 5: Στιγμιότυπο απο το στρατιωτικό σύστημα υποβοήθησης SAS	18
Εικόνα 6: Μοντέλο Επικοινωνίας Δικτύων Αισθητήρων.....	25
Εικόνα 7: : (α) Συνεργατική (β) Μη - Συνεργατική Μέθοδος δεδομένων.....	26
Εικόνα 8: Τελική μορφή μοντέλου OSI στα Δίκτυα Αισθητήρων	27
Εικόνα 9: Προβλεπόμενη με το AEON κατανάλωση ρεύματος για κάθε component	32
Εικόνα 10: Προβλεπόμενη επέκταση χρόνου ζωής όταν χρησιμοποιείται Power Management.....	33
Εικόνα 11: Μέτρηση κατανάλωσης ρεύματος της εκπομπής ενός μηνύματος με μέγιστη ισχύ αποστολής.....	35
Εικόνα 12: Κατανάλωση ρεύματος για την εφαρμογή CntToLedsAndRfm.....	37
Εικόνα 13: Η αρχιτεκτονική και τα βασικά συστατικά του SPOT.....	39
Εικόνα 14: Μέτρηση ενέργειας φορτίου 9.09 μ A για χρόνοπάνω από 7 λεπτά. Η απόκλιση είναι 0.1 mJ ή 3% της πραγματικής ενέργειας	40
Εικόνα 15: Μέτρηση ενέργειας και ισχύος ενός TelosB mote χρησιμοποιώντας το SPOT και ένα παλμογράφο ψηφιακής αποθήκευσης. Στο πάνω γράφημα, τα επίπεδα τμήματα δίνουν την ενέργεια που καταναλώθηκε κατα τη διάρκεια sleep mode, ενώ οι απότομες ανυψώσεις ενδιάμεσα καταναλώσεις σε active mode. Το κάτω γράφημα δείχνει την κατανάλωση ρεύματος (ισχύος) από το SPOT σε καταστάσεις διαρκούς αλλαγής κατανάλωσης ενέργειας.....	41
Εικόνα 16: Η ασύρματη μονάδα Tmote sky.....	52
Εικόνα 17: εμπρόσθια όψη του Tmote sky.....	58
Εικόνα 18: Οπίσθια όψη του Tmote sky.....	58
Εικόνα 19: Δομικό διάγραμμα στρωμάτων της αρχιτεκτονικής του TinyOS	66
Εικόνα 20: γραφική απεικόνιση του συστατικού TimerM	72
Εικόνα 21: Δομή του TinyOS	73
Εικόνα 22: Αρχιτεκτονική Συστήματος.....	78
Εικόνα 23: Εγκατάσταση συστήματος	80
Εικόνα 24: Περιβάλλον εφαρμογής Sky-boards-collect.....	82
Εικόνα 25: Επιλογή firmware	83
Εικόνα 26: Διεπαφή λειτουργίας Δικτύου	84
Εικόνα 27: Δομή δικτύου.....	85
Εικόνα 28: Απεικόνιση αριθμού γειτόνων.....	85
Εικόνα 29: Απεικόνιση χρόνου μεταξύ των beacon μηνυμάτων	86
Εικόνα 30: Απεικόνιση του ETX (expected number of transmissions).....	86
Εικόνα 31: Απεικόνιση του routing metric.....	87
Εικόνα 32: Απεικόνιση χαμένων πακέτων	87
Εικόνα 33: Απεικόνιση καθυστερήσεων	88
Εικόνα 34: Απεικόνιση αριθμού απεσταλμένων πακέτων	88
Εικόνα 35: Απεικόνιση θερμοκρασίας ανα αισθητήριο	89
Εικόνα 36: Απεικόνιση επιπέδου μπαταρίας των αισθητηρίων	89
Εικόνα 37: Απεικόνιση θερμοκρασίας	90
Εικόνα 38: Απεικόνιση υγρασίας	90
Εικόνα 39: Απεικόνιση επιπέδου φωτός – αισθητήρας 1	91
Εικόνα 40: Απεικόνιση επιπέδου φωτός – αισθητήρας 2	91

Εικόνα 41: Duty cycle αισθητήρων	92
Εικόνα 42: Αναλυτική μέση κατανάλωση ισχύος αισθητήρων	93
Εικόνα 43: Αναλυτική στιγμιαία κατανάλωση ισχύος αισθητήρων	93
Εικόνα 44: Συνολική κατανάλωση ισχύος αισθητήρων	94
Εικόνα 45: Διεπαφή Cosm Feed	94
Εικόνα 46: Αποτελέσματα στην σελίδα Cosm.com	95

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΧΩΝ

1. Εισαγωγή στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

1.1 Γενικά στοιχεία

Εδώ και πολλούς αιώνες, βασική μέριμνα της ανθρωπότητας αποτελεί η μεταφορά – μετάδοση πληροφορίας, με τον ταχύτερο και ασφαλέστερο δυνατό τρόπο. Άμεσο επακόλουθο της ανάγκης αυτής ήταν η έλευση των τηλεπικοινωνιών, στις αρχές του περασμένου αιώνα, για να καταλήξουμε στις μέρες της τηλεπικοινωνιακής επανάστασης που διανύουμε, όπου η επικοινωνία έχει μπει στην καθημερινή μας ζωή με ποικίλους τρόπους. Ο τομέας δε, στον οποίο παρατηρείται η εντονότερη κινητικότητα σε ερευνητικό επίπεδο, έχει να κάνει με τα δίκτυα υπολογιστικών μηχανών. Με την είσοδο στον 21^ο αιώνα και στα πλαίσια της γενικής παγκοσμιοποίησης σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, ριζικές αλλαγές παρατηρούνται κυρίως στις ασύρματες επικοινωνίες, δηλαδή εκείνες στις οποίες η πληροφορία μεταδίδεται με τη μορφή ραδιοκύματος στον αέρα. Έτσι, οι ασύρματες επικοινωνίες βρίσκονται στην κορυφή της πυραμίδας του ερευνητικού ενδιαφέροντος και παρουσιάζουν μια αλματώδη εξέλιξη, χαρακτηριζόμενη από την προσπάθεια για τη συνεχή δημιουργία νέων, φιλικών προς το χρήστη τεχνολογιών, που έχουν τη δυνατότητα να διευκολύνουν τη ζωή μας σε επίπεδο πάμπολλων εφαρμογών. Η πρόοδος αυτή της τεχνολογίας των ασυρμάτων επικοινωνιών επισύρει οφέλη για τους χρήστες και κέρδη για τους δημιουργούς της.

Η ουσιαστική εξέλιξη των προσωπικών ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων ξεκινά γύρω στα 1980 με συστήματα που βασίζονταν σε μεθόδους αναλογικής διαμόρφωσης. Οι ταχύτατα αυξανόμενες ανάγκες όμως σε απαιτήσεις, σε συνδυασμό με την αδιάκοπη ερευνητική προσπάθεια πάνω σε νέες τεχνολογίες, έφεραν στο προσκήνιο νέα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, στις αρχές τις δεκαετίας του '90, σηματοδοτώντας την έναρξη της εποχής των ψηφιακών συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών.

Η ανάπτυξη και ευρεία χρήση των υπηρεσιών που παρέχονταν από τα συστήματα αυτά άνοιξε διάπλατα νέους ορίζοντες στον τομέα των ασύρματων

επικοινωνιών. Ορόσημο αποτέλεσε η ανάπτυξη ασύρματων δικτύων στα οποία οι χρήστες ανταλλάσσουν δεδομένα απευθείας μεταξύ τους οργανωμένοι σε τοπικές ασύρματες δομές, οι οποίες είναι δυνατό να μεταβάλλονται δυναμικά. Τα δίκτυα αυτά, γνωστά στη βιβλιογραφία σαν «ad – hoc δίκτυα», έθεσαν ένα πλήθος νέων προκλήσεων στον παγκόσμιο ερευνητικό χώρο και άνοιξαν την πόρτα, σε ακόμα νεότερες τεχνολογίες που αναμένεται να βοηθήσουν σημαντικά την ανθρωπότητα στο άμεσο μέλλον.

1.2 Περιγραφή Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

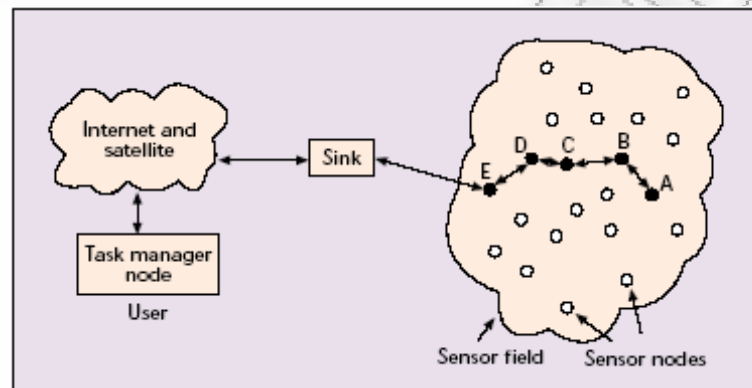
Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή δημιουργία και εισαγωγή στη ζωή μας νέων τεχνολογιών, μερικές από τις οποίες αποδεικνύονται περισσότερο από χρήσιμες. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει και η τεχνολογία των κόμβων - αισθητήρων. Πρόκειται για μικρούς πομποδέκτες που έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν πληροφορίες από το περιβάλλον, να τις επεξεργάζονται, αλλά και να δημιουργούν μεταξύ τους ένα δυναμικό δίκτυο μέσω του οποίου μπορούν να ανταλλάσσουν τις πληροφορίες αυτές, επικοινωνώντας ασύρματα. Και φυσικά όλες τις παραπάνω λειτουργίες τις πραγματοποιούν με τη βοήθεια πηγής ενέργειας που εμπεριέχουν.

Οι αισθητήρες συνήθως χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες μαζί, και διασκορπίζονται κοντά στο φαινόμενο το οποίο θέλουμε να παρατηρήσουμε συλλέγοντας δεδομένα. Όπως προαναφέρθηκε, όλοι οι κόμβοι έχουν πομπούς και δέκτες για επικοινωνία, και το δίκτυο που δημιουργείται μεταξύ τους είναι δυναμικό, δηλαδή οι θέσεις τους δεν είναι προκαθορισμένες αλλά τυχαίες και δυνατόν να αλλάζουν. Τα δεδομένα που μπορούν να συλλέγουν ποικίλλουν και κατά συνέπεια είναι πάρα πολλές και οι δυνατές εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής.

Για παράδειγμα, οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να φανούν πολύ χρήσιμοι σε τομείς όπως η υγεία, ο στρατός, η μετεωρολογία, η ασφάλεια κλπ. Θα μπορούσαν να δίνουν σημαντικότερες πληροφορίες σε ένα γιατρό για κάποιον ασθενή, εφόσον τοποθετηθούν σε κατάλληλο σημείο. Επίσης είναι δυνατόν να ανιχνεύουν διάφορες χημικές ουσίες στον αέρα ή στο νερό ή ακόμα και να ανιχνεύουν επίπεδα μόλυνσης στην ατμόσφαιρα. Γενικότερα, η δυνατότητά τους τόσο να συλλέγουν δεδομένα όσο και να επικοινωνούν μεταξύ τους, τους κάνει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο σε πάρα πολλές περιπτώσεις.

Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό των αισθητήρων αυτών, είναι οι περιορισμένες δυνατότητες που έχουν όσον αφορά την ισχύ που μπορούν να καταναλώνουν. Οι πηγές που ενσωματώνονται μέσα στους αισθητήρες δεν είναι δυνατό να είναι πολύ ισχυρές, με αποτέλεσμα τελικά στα

δίκτυα αυτά πρωταρχικός στόχος να είναι η επίτευξη της κατανάλωσης όσο το δυνατόν λιγότερης ενέργειας, στόχος ακόμα σημαντικότερος και από την ποιότητα των υπηρεσιών του δικτύου, καθώς σχετίζεται άμεσα με τη βιωσιμότητά του.



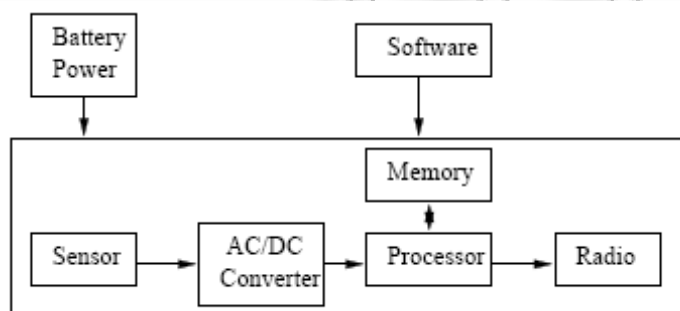
Εικόνα 1: Διασπορά αισθητήρων σε ένα πεδίο παρακολούθησης και αποστολή δεδομένων σε ένα σταθμό βάσης.

Πηγή: Akyldiz (2002), *A survey on sensor networks*

Ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό μονάδων-αισθητήρων κατάλληλα τοποθετημένων είτε μέσα στο φαινόμενο παρατήρησης ή πολύ κοντά σε αυτό. Η θέση αυτή των αισθητήρων μπορεί να μην είναι σχεδιασμένη ή προκαθορισμένη. Αυτό επιτρέπει την ‘τυχαία’ ανάπτυξη τους σε περιβάλλοντα μη προσπελάσιμα από τον άνθρωπο ή σε επιχειρήσεις αντιμετώπισης καταστροφών. Από την άλλη πλευρά, αυτό προϋποθέτει ότι τα πρωτόκολλα και οι αλγόριθμοι των δικτύων αυτών έχουν την ικανότητα να οργανώνονται από μόνα τους. Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό των δικτύων αισθητήρων είναι και η συνεχής επικοινωνία μεταξύ των κόμβων-αισθητήρων. Κάθε κόμβος ενσωματώνει και έναν επεξεργαστή που του δίνει την δυνατότητα, αντί να στείλει κατευθείαν τα δεδομένα σε έναν καθορισμένο κόμβο που έχει αναλάβει τη μίξη τους, να χρησιμοποιεί ο ίδιος πρώτα τον επεξεργαστή του για την εκτέλεση καθορισμένων απλών υπολογισμών και στη συνέχεια να αποστέλλει μόνο τα απαραίτητα και μερικώς επεξεργασμένα δεδομένα. Η ενσωμάτωση της

δυνατότητας τοπική επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων επιτρέπει στις μονάδες να εκτελέσουν πολύπλοκες λειτουργίες σύμφωνα με την εκάστοτε εφαρμογή που υλοποιούν. Επίσης, η δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ τους επιτρέπει όχι μόνο τη μεταφορά και τον έλεγχο των δεδομένων κατά μήκος του δικτύου, αλλά και τη συνεργασία μεταξύ των μονάδων-κόμβων προς επίτευξη πολύπλοκων αλγορίθμων και εργασιών, όπως είναι η συνάθροιση δεδομένων (data aggregation) , η στατιστική δειγματοληψία και η παρακολούθηση της κατάστασης και της υγείας ενός συστήματος.

Μια γενική εικόνα της αρχιτεκτονικής μιας μονάδας- αισθητήρα φαίνεται στην Εικόνα.



Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική μονάδας δικτύων αισθητήρων

Πηγή: Akildyz et al 2001: A wireless sensor network survey

Από την εικόνα αυτή παρατηρούμε ότι τα βασικά υποσυστήματα από τα οποία αποτελείται ένας κόμβος είναι το υποσύστημα μετάδοσης δεδομένων, το υποσύστημα επεξεργασίας και το υποσύστημα αισθητήρα.

- Το *υποσύστημα μετάδοσης δεδομένων* είναι το πλέον σημαντικό σύστημα ενός κόμβου μιας και αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή ενέργειας, επηρεάζοντας έτσι την απόδοση του κόμβου αλλά και τη συνολική απόδοση του δικτύου. Θέματα που απασχολούν την έρευνα στον τομέα του υποσυστήματος μετάδοσης αφορούν την ακτίνα εκπομπής, τον τύπο διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται καθώς και τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

- Το *υποσύστημα επεξεργασίας* αποτελεί επίσης σημαντικό στοιχείο για την λειτουργία και τη συμπεριφορά μιας μονάδας και, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, της δίνει τη δυνατότητα εκτέλεσης πολύπλοκων λειτουργιών. Στους σύγχρονους μικροελεγκτές ενσωματώνονται μνήμες τύπου flash και RAM, A/D μετατροπείς και ψηφιακά I/O σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα χαμηλού κόστους. Η επιλογή του μικροελεγκτή στηρίζεται επιπλέον σε παράγοντες όπως η κατανάλωση ενέργειας, οι απαιτήσεις σε τάση λειτουργίας, το κόστος, η υποστήριξη περιφερειακών, ο χρόνος αφύπνιση και η ταχύτητα του.

- Το *υποσύστημα αισθητήρων* παρέχει τη διεπαφή (interface) εκείνη που αναλαμβάνει τη μετατροπή των σημάτων του φυσικού κόσμου σε καταληπτή μορφή για τις ηλεκτρονικές συσκευές. Έτσι οι αισθητήρες μετατρέπουν μη ηλεκτρικές ή χημικές ποσότητες σε ηλεκτρικά σήματα. Η κινητήριος δύναμη η οποία έδωσε ώθηση στην τεχνολογία αισθητήρων είναι η αλματώδης εξέλιξη στην επεξεργασία σήματος και στη μικρομηχανική τεχνολογία. Κατά την επιλογή ενός αισθητήρα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι απαιτήσεις της εφαρμογής για την οποία θα αναπτυχθεί το δίκτυο, ο ρυθμός δειγματοληψίας του αισθητήρα, οι απαιτήσεις σε voltage και σε ενέργεια.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά εξασφαλίζουν μια πληθώρα εφαρμογών για τα δίκτυα αισθητήρων. Κάποια από τα πεδία εφαρμογών που θα περιγραφούν και στη συνέχεια είναι στους τομείς της υγείας, του στρατού και της ασφάλειας. Επίσης ασύρματα δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή περιβαλλοντολογικών δεδομένων. Στην ουσία, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρέχουν στον τελικό χρήστη την πληροφορία για μια καλύτερη κατανόηση του περιβάλλοντος. Υπάρχει η προοπτική τα δίκτυα αυτά να αποτελέσουν στο μέλλον ένα καθημερινό στοιχείο της ζωής μας, ακόμα περισσότερο και από την σημερινή διείσδυση των προσωπικών υπολογιστών στη ζωή μας.

Η υλοποίηση των παραπάνω αλλά και άλλων εφαρμογών απαιτεί τη χρήση ασύρματης ad hoc δικτύωσης. Παρόλο που πολλά πρωτόκολλα και αλγόριθμοι έχουν προταθεί για τα παραδοσιακά ασύρματα ad hoc δίκτυα, εντούτοις δεν είναι κατάλληλα να εξυπηρετήσουν τα μοναδικά χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις των εφαρμογών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Αυτό οφείλεται και στις παρακάτω βασικές διαφορές μεταξύ των δικτύων αισθητήρων και των ad hoc δικτύων :

- Ο αριθμός των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να είναι πολλαπλάσιος των κόμβων σε ένα ad hoc δίκτυο
- Οι κόμβοι-αισθητήρες βρίσκονται σε πυκνή διάταξη
- Οι κόμβοι-αισθητήρες είναι επιρρεπείς σε αποτυχίες-σφάλματα
- Η τοπολογία ενός δικτύου αισθητήρων μεταβάλλεται συχνά
- Οι κόμβοι-αισθητήρες χρησιμοποιούν κυρίως επικοινωνία *ευρυεκπομπής (broadcast communication)* τη στιγμή που τα περισσότερα ad hoc δίκτυα βασίζονται σε επικοινωνίες από σημείο σε σημείο (*point-to-point*)
- Οι κόμβοι-αισθητήρες έχουν περιορισμένη ισχύ, υπολογιστική ικανότητα και μνήμη
- Οι κόμβοι-αισθητήρες μπορεί να μην έχουν ένα παγκόσμιο αναγνωριστικό ταυτότητας (ID) λόγω της ύπαρξης ενός μεγάλου αριθμού αισθητήρων

Από τη στιγμή που ένας μεγάλος αριθμός μονάδων-αισθητήρων αναπτύσσονται σε πυκνή διάταξη, οι γείτονες κόμβοι ενδέχεται να είναι πολύ κοντά ο ένας με τον άλλο. Συνεπώς, μια *πολύ(ραδιο)αλματική επικοινωνία (multihop communication)* στα δίκτυα αισθητήρων αναμένεται να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια απ' ό τι η παραδοσιακή *μονοαλματική επικοινωνία (single-hop communication)*. Επιπλέον, τα επίπεδα ισχύος εκπομπής μπορούν να κρατηθούν σε χαμηλά επίπεδα, κάτι που είναι ιδιαίτερα επιθυμητό σε κατασκοπευτικές δραστηριότητες. Η multihop επικοινωνία μπορεί επίσης να υπερνικήσει κάποιες από τις επιπτώσεις διάδοσης σήματος που παρατηρούνται σε ασύρματες επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων.

Ένας από τους σημαντικότερους περιορισμούς στους κόμβους-αισθητήρες είναι η απαίτηση για χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Οι μονάδες αυτές χρησιμοποιούν περιορισμένες, συνήθως μη αντικαταστάσιμες κατά τη

διάρκεια της λειτουργίας τους, ενεργειακές πηγές. Γι' αυτό το λόγο, ενώ τα παραδοσιακά δίκτυα έχουν ως στόχο να παρέχουν υψηλή ποιότητα υπηρεσίας (QOS), τα πρωτόκολλα των δικτύων αισθητήρων εστιάζουν πρωταρχικά στη διατήρηση ισχύος. Πρέπει να έχουν ενσωματωμένους μηχανισμούς εξισορρόπησης οι οποίοι θα δίνουν στον τελικό χρήστη τη δυνατότητα παράτασης της ζωής λειτουργίας του δικτύου με κόστος τη χαμηλότερη ρυθμαπόδοση (throughput) ή τη μεγαλύτερη καθυστέρηση μετάδοσης.

1.3 Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Οι αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν και να επεξεργάζονται πολλών ειδών πληροφορίες, γεγονός που τους κάνει ιδιαίτερα χρήσιμους σε πολλούς τομείς. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να είναι θερμοκρασία, πίεση, υγρασία, ταχύτητα, διεύθυνση κίνησης, φωτισμός και άλλα πολλά. Οι πολυπληθείς εφαρμογές τους εδώ κατηγοριοποιούνται στους παρακάτω τομείς.

Στην κατηγορία των περιβαλλοντικών εφαρμογών έχουμε καταρχήν την καταγραφή της εξελικτικής διαδικασίας ενός οικοσυστήματος (υδάτινου, χερσαίου, δασικού, αστικού).



Εικόνα 3: Ασύρματος αισθητήρας τύπου crossbow για την εφαρμογή firementor

Πηγή:

http://www.google.gr/imgres?hl=en&rlz=1C1GGGE_eIGR470GR471&biw=1920&bih=912&tbn=isch&tbnid=ZIAPeC2nwGSHOM:&imgrefurl=http://www.firementor.gr/photos.htm&docid=HDZfxEPwI5uWmM&itg=1&imgurl=http://www.firementor.gr/photos/3aisth.jpg&w=1000&h=667&ei=r7ZZUNiRCePO0QXdhICQBA&zoom=1&iact=rc&dur=466&sig=102049071759063807567&page=2&tbnh=137&tbnw=199&start=52&ndsp=57&ved=1t:429,r:13,s:52,i:271&tx=69&ty=55

Επιπλέον μέσω ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι δυνατή η καταγραφή του μικροκλίματος σε εργασιακούς χώρους και άλλες μεγάλες εγκαταστάσεις για τη βελτιστοποίηση της χρήσης των κλιματιστικών συστημάτων .

Στις περιβαλλοντικές εφαρμογές περιλαμβάνεται και η πρόληψη και ανίχνευση εκδήλωσης φωτιάς σε υπαίθριους ή κλειστούς χώρους, όπως και η παρακολούθηση της εξέλιξης γεωργικών καλλιεργειών αλλά και η καταγραφή γεωφυσικών φαινομένων.

Μια άλλη κατηγορία εφαρμογών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι αυτή του οικιακού αυτοματισμού. Σε αυτήν την κατηγορία, μπορεί να συμπεριληφθεί η αυτόματη ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του φωτισμού σε χώρους που υπάρχει δραστηριότητα, όπως και η αυτόματη ρύθμιση της θερμοκρασίας ή της έντασης του φωτισμού ανάλογα με τις εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες.

Υπάρχουν επίσης εφαρμογές ασφαλείας, όπως για παράδειγμα η παρακολούθηση χώρων και για λόγους ασφαλείας και ενημέρωση κάποιας εποπτεύουσας εφαρμογής σε τακτά χρονικά διαστήματα ή όταν λάβει χώρα ένα περιστατικό ενδιαφέροντος, όπως παραβίαση χώρου ή πυρκαγιά.

Αναφορικά με στρατιωτικές εφαρμογές, στον τομέα του στρατού τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμα. Με δεδομένο ότι βασίζονται στον τυχαίο διασκορπισμό μικρών και φθηνών αισθητήρων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές στρατιωτικές επιχειρήσεις, με την πιθανή καταστροφή μερικών αισθητήρων να μην δημιουργεί πρόβλημα. Καταρχήν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίβλεψη και τον έλεγχο των συμμαχικών δυνάμεων, του εξοπλισμού και των πολεμοφοδίων. Με την τοποθέτηση αισθητήρων σε κάθε αποθήκη, όχημα ή και όπου αλλού κρίνεται απαραίτητο, μπορεί ο υπεύθυνος του κάθε στρατοπέδου, με τη βοήθεια κεντρικών κόμβων που θα συλλέγουν όλες τις πληροφορίες, να ελέγχει κάθε στιγμή την τρέχουσα κατάσταση.

Επίσης, οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον έλεγχο των κινήσεων του εχθρού. Διασκορπισμένοι σε διαδρομές και μονοπάτια που αποτελούν πιθανό πέρασμα εχθρικών δυνάμεων, μπορούν να δώσουν πολύτιμες πληροφορίες για τις μετακινήσεις τους. Χρησιμοποιούνται επίσης για στόχευση σε πολεμικά συστήματα, ή ακόμη και για καταμέτρηση ζημιών σε ένα στρατόπεδο ή πεδίο μάχης μετά από μια σύγκρουση.

Τέλος, οι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν κάποιο χημικό στοιχείο ενημερώνοντας έγκαιρα για μια πιθανή χημική επίθεση (Bhardwaj et. al, 2001).



Εικόνα 4 Το στρατιωτικό σύστημα υποβήθησης στρατιωτών SaS

Πηγή: Bhardwaj et. al, 2001



Εικόνα 5: Στιγμιότυπο από το στρατιωτικό σύστημα υποβοήθησης SAS

Πηγή: Bhardwaj et. al, 2001

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι επίσης χρήσιμα σε εφαρμογές αντιμετώπισης φυσικών καταστροφών, όπως για παράδειγμα για πρόληψη και διάγνωση σεισμικής δραστηριότητας, για εντοπισμό παγιδευμένων ατόμων αλλά και άλλες εφαρμογές.

Στον νευραλγικό τομέα της υγείας η εφαρμογή των δικτύων αισθητήρων είναι πολλαπλή και μπορεί να βοηθήσει σε σημαντικά προβλήματα.

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι με τη βοήθεια των αισθητήρων, οι οποίοι μπορεί να είναι τοποθετημένοι σε διάφορα σημεία στον ασθενή, ο γιατρός μπορεί να συλλέξει ποικίλες πληροφορίες για διάφορα θέματα, όπως π.χ. για συμπτώματα ασθενειών πριν αυτά γίνουν αντιληπτά εμφανώς, ενώ είναι δυνατός και ο έλεγχος ηλικιωμένων ή ανθρώπων με ειδικές ανάγκες. Παράλληλα, είναι δυνατή η παρακολούθηση διαφόρων παραμέτρων σε ασθενείς. Για παράδειγμα, μπορεί ένας αισθητήρας να δίνει πληροφορίες για τους παλμούς της καρδιάς, ένας άλλος για την πίεση του αίματος κ.λ.π. Αλλά και γιατροί θα μπορούν να φέρουν πάνω τους αισθητήρες που θα επιτρέπουν στους συναδέλφους τους να τους εντοπίζουν μέσα σε ένα νοσοκομείο σε περίπτωση ανάγκης.

Σε αισθητήρες βασίζονται και συστήματα καταγραφής κρίσιμων βιοσημάτων. Τέτοιου είδους βιοσήματα είναι το ηλεκτροκαρδιογράφημα, το ηλεκτρομυογράφημα, το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα, ο κορεσμός του οξυγόνου στο αίμα, η θερμοκρασία του ασθενούς, η αναπνοή που αποτελεί και το εργαστηριακό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η πίεση κ.α. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τέτοιου είδους εφαρμογές σε πειραματικό στάδιο που μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία. Οι πιο γνωστές είναι το Codeblue από το πανεπιστήμιο του Χάρβαρντ, το ActiS στο πανεπιστήμιο της Αλαμπάμα και το MIThril στο MIT.

Τέλος, αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό αλλεργιών στους ασθενείς με αποτέλεσμα να περιορίζονται οι πιθανότητες να λάβουν ακατάλληλη φαρμακευτική αγωγή (Noury et. al., 2000).

1.4 Περιβάλλοντα Λειτουργίας

Έχοντας τονίσει την πληθώρα των εφαρμογών όπου ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να λειτουργήσει, είναι προφανές ότι αντίστοιχα ευρύ είναι και το φάσμα των διαφορετικών περιβαλλόντων, στα οποία τα δίκτυα αυτά καλούνται να μεταδώσουν πληροφορίες. Το περιβάλλον στο οποίο μπορεί να λειτουργεί και να αναπτύσσεται ένα δίκτυο αισθητήρων είναι ιδιαίτερα σημαντικό και μπορεί να μας βοηθήσει να καταλάβουμε το μέγεθος των προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν. Συγκεκριμένα, ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να βρίσκεται:

- Στο εσωτερικό μηχανών
- Στο βάθος του ωκεανού
- Μέσα σε έναν τυφώνα
- Σε ένα πεδίο μάχης
- Πάνω ή και μέσα στο σώμα ανθρώπων ή ζώων
- Μέσα σε ένα ποτάμι ή λίμνη

Αυτές είναι μερικές μόνο περιπτώσεις, από τις οποίες φαίνεται καθαρά ότι οι συνθήκες κάτω από τις οποίες λειτουργούν οι αισθητήρες είναι μπορεί να είναι αντίξοες: σε υψηλή πίεση, σε πολύ ζέστη ή κρύο, σε ανώμαλα εδάφη. Είναι επιτακτική λοιπόν η ανάγκη του σχεδιασμού των αισθητήρων με γνώμονα και την φυσική αντοχή τους στις καταστάσεις αυτές.

1.5 Αρχές σχεδιασμού δικτύων αισθητήρων

Στην προσπάθεια για την αξιολόγηση μιας αρχιτεκτονικής δικτύων αισθητήρων ορίζονται οι παρακάτω δείκτες, οι οποίοι αναφέρονται στη συνολική απόδοση του δικτύου και αποτελούν ταυτόχρονα και επιθυμητούς στόχους κατά τη σχεδίαση.

Οι δείκτες αυτοί είναι:

1. Χρόνος Ζωής
2. Κάλυψη και Επεκτασιμότητα
3. Κόστος Παραγωγής και Ευκολία Ανάπτυξης
4. Αντοχή σε Σφάλματα
5. Συγχρονισμός και χρόνος απόκρισης
6. Ασφάλεια.

1.5.1 Χρόνος Ζωής

Αποφασιστικό χαρακτηριστικό στην ανάπτυξη ενός δικτύου αισθητήρων είναι ο αναμενόμενος χρόνος ζωής του, και κυριότερος περιοριστικός παράγοντας στην διάρκεια ζωής του είναι η χωρητικότητα του συσσωρευτή ενέργειας του συστήματος. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι σε πολλές εφαρμογές, κρίσιμο χαρακτηριστικό δεν είναι ο μέσος χρόνος ζωής ενός κόμβου, αλλά ο ελάχιστος εκτιμώμενος χρόνος ζωής.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της πεπερασμένης χωρητικότητας των συσσωρευτών έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές, οι οποίες αποσκοπούν στη μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής του δικτύου. Στη σημαντικότερη από αυτές, ο στόχος επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στα συστατικά δομικά στοιχεία του κόμβου και ειδικότερα στον πομπό, ο οποίος αποτελεί το τμήμα του κόμβου που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας.

Τελευταία, μια νέα μέθοδος τοποθετεί στους κόμβους του δικτύου, συσκευές που έχουν τη δυνατότητα να 'συλλαμβάνουν' και να εκμεταλλεύονται την ενέργεια που βρίσκεται διάχυτη στον περιβάλλοντα χώρο του κόμβου. Τέτοιες συσκευές είναι τα ηλιακά κύτταρα, οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες, οι μικροανεμογεννήτριες κλπ.

1.5.2 Κάλυψη και Επεκτασιμότητα

Αμέσως επόμενοι σημαντικοί παράγοντες, μετά το χρόνο ζωής, είναι η κάλυψη και η επεκτασιμότητα. Όπως είναι προφανές είναι σημαντικό για τον τελικό χρήστη να μπορεί να αναπτύξει δίκτυα τα οποία καλύπτουν μια ευρεία περιοχή παρατήρησης. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι η κάλυψη του δικτύου δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την ακτίνα κάλυψης των επικοινωνιακών συνδέσεων που χρησιμοποιεί ο κάθε κόμβος. Με τη χρήση multi-hop τεχνικών είναι εφικτή η επέκταση της κάλυψης αρκετά πιο μακριά από την ακτίνα που επιτρέπει ο χρησιμοποιούμενος πομπός. Θεωρητικά, η επέκταση της ακτίνας κάλυψης του δικτύου τείνει στο άπειρο αλλά αποδεικνύεται ότι μετά από έναν αριθμό από hops και μια συγκεκριμένη ακτίνα εκπομπής, το συνολικό ισοζύγιο κατανάλωσης ισχύος του δικτύου αυξάνεται ενώ ταυτόχρονα μειώνεται ο χρόνος αντίδρασής του.

Η επεκτασιμότητα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων. Ανάλογα με την εφαρμογή, ο αριθμός των κόμβων που συμμετέχουν κυμαίνεται από λίγους αισθητήρες έως μερικές εκατοντάδες αισθητήρων. Ακόμα θα πρέπει να υπάρχουν κατάλληλοι μηχανισμοί που να επιτρέπουν την προσθήκη νέων κόμβων χωρίς να διαταράσσεται η λειτουργία του δικτύου.

1.5.3 Κόστος Παραγωγής και Ευκολία Ανάπτυξης

Μιας και τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από πολλούς κόμβους, το κόστος κάθε κόμβου παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του συνολικού

κόστους του δικτύου. Επιδιώκεται το κόστος του κάθε κόμβου να είναι χαμηλό ώστε το συνολικό κόστος του δικτύου να είναι χαμηλότερο από το κόστος ενός συμβατικού δικτύου αντίστοιχων δυνατοτήτων.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό είναι η ευκολία ανάπτυξης. Η ανάπτυξη του δικτύου, στο χώρο λειτουργίας του, πρέπει να είναι εφικτή και από μη εξειδικευμένο προσωπικό. Μια τέτοια δυνατότητα προϋποθέτει να έχει το δίκτυο την ικανότητα να αυτορυθμίζεται. Στην ιδεατή περίπτωση, το σύστημα θα είναι ικανό να ρυθμίζεται αυτόματα, ανεξάρτητα από την κατάσταση που επικρατεί στο περιβάλλον όπου τοποθετείται.

1.5.4 Αντοχή σε Σφάλματα

Σημαντικός δείκτης απόδοσης ενός συστήματος αισθητήρων είναι και η αντοχή του στα σφάλματα. Κάποιοι κόμβοι μπορεί να πάψουν να λειτουργούν λόγω βλάβης, λόγω αστοχίας κάποιου υποσυστήματος τους ή λόγω παρεμβολών από κάποιο εξωτερικό αίτιο. Στην περίπτωση αυτή, το σφάλμα λειτουργίας ενός κόμβου ή μιας ομάδας κόμβων δε θα πρέπει να επηρεάζει τη συνολική λειτουργία του δικτύου.

Η ιδιότητα αυτή λέγεται αξιοπιστία του συστήματος ή αντοχή σε σφάλματα και ορίζεται ως η ικανότητα διατήρησης των λειτουργιών του δικτύου χωρίς διακοπή, σε περιπτώσεις βλάβης κάποιων κόμβων του δικτύου.

1.5.5 Συγχρονισμός και χρόνος απόκρισης

Σε ορισμένες κατηγορίες εφαρμογών, όπως σε εφαρμογές επιτήρησης και εντοπισμού, δεδομένα από πολλούς κόμβους πρέπει να συσχετισθούν χρονικά ώστε γίνει εφικτός ο εντοπισμός βασικών παραμέτρων του φαινομένου που παρατηρείται. Για να επιτευχθεί ο συγχρονισμός, πρέπει το δίκτυο να είναι ικανό να κατασκευάζει και διατηρεί μια καθολική ώρα συστήματος, η οποία θα χρησιμοποιείται για τη χρονική ταξινόμηση των δεδομένων που καταγράφονται σε κάθε κόμβο του δικτύου. Για να είναι δυνατή η παραπάνω διαδικασία απαιτείται η ύπαρξη ενός μηχανισμού που θα

διαχειρίζεται τις διαδικασίες διατήρησης και διασποράς, μεταξύ των κόμβων, των μηνυμάτων, με πληροφορίες συγχρονισμού.

Σε κάποιες εφαρμογές, όπως είναι τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης και συναγερμού, ο χρόνος αντίδρασης είναι ο σημαντικότερος παράγοντας σχεδίασης και αξιολόγησης ενός δικτύου. Ωστόσο, η ικανότητα του δικτύου να έχει μικρό χρόνο απόκρισης έρχεται σε σύγκρουση με άλλους δείκτες, π.χ. με το χρόνο ζωής του συστήματος. Η αντίφαση αυτή αίρεται με την ενσωμάτωση στο δίκτυο, κόμβων που βρίσκονται σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας.

Η λύση αυτή εξασφαλίζει τον επιθυμητό χρόνο αντίδρασης αλλά έχει αρνητική επίπτωση στην ευκολία ανάπτυξης του δικτύου.

1.5.6 Ασφάλεια

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να είναι ικανά να κρατούν κρυφή, από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες, την πληροφορία που συλλέγουν. Έτσι, για να μπορέσει να διατηρηθεί η μυστικότητα, το δίκτυο πρέπει να υποστηρίζει μηχανισμούς κρυπτογράφησης και αυθεντικότητας.

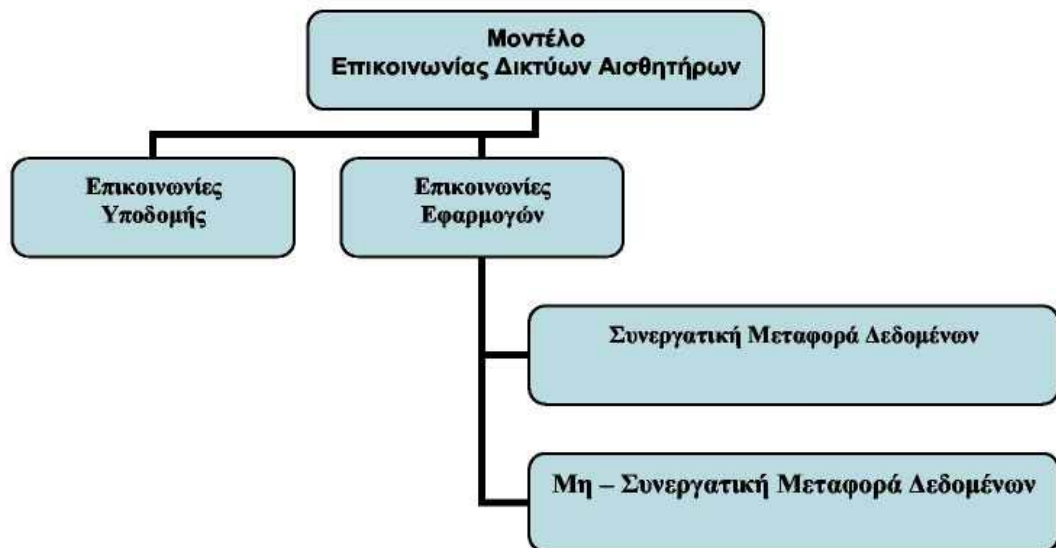
Η χρήση τέτοιων τεχνικών επιδρούν αρνητικά τόσο στην κατανάλωση ισχύος όσο και στο διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου ενώ, η ενσωμάτωση επιπλέον bits στα μεταφερόμενα πακέτα, τα οποία περιέχουν τις πληροφορίες αυθεντικότητας, μειώνουν τον αριθμό των πραγματικών δειγμάτων που μπορούν να μεταφερθούν από ένα κόμβο.

1.6 Ένα μοντέλο δικτύου για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά προτεινόμενα μοντέλα δικτύου. Σε όλα τα μοντέλα διακρίνονται δύο βασικές κατηγοριοποιήσεις στα μηνύματα που εκπέμπονται ανάμεσα στους κόμβους, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει συμφωνία στα επίπεδα του δικτύου που χρησιμοποιούνται.

Μελετώντας όμως τα επικοινωνιακά πρότυπα (patterns) που διακινούνται, συστηματικά, ο σχεδιαστής του δικτύου είναι σε θέση να επιλέξει εκείνη την δικτυακή υποδομή και πρωτόκολλο το οποίο θα συνδυάζει τη βέλτιστη απόδοση και επίδοση με το χαμηλότερο κόστος ανάπτυξης και το μέγιστο χρόνο ζωής.

Νοηματικά, οι μορφές επικοινωνίας σε ένα δίκτυο αισθητήρων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στην επικοινωνία, που εξυπηρετεί τις εφαρμογές και στην επικοινωνία υποδομής, που εξυπηρετεί την λειτουργία και διαχείριση του δικτύου.



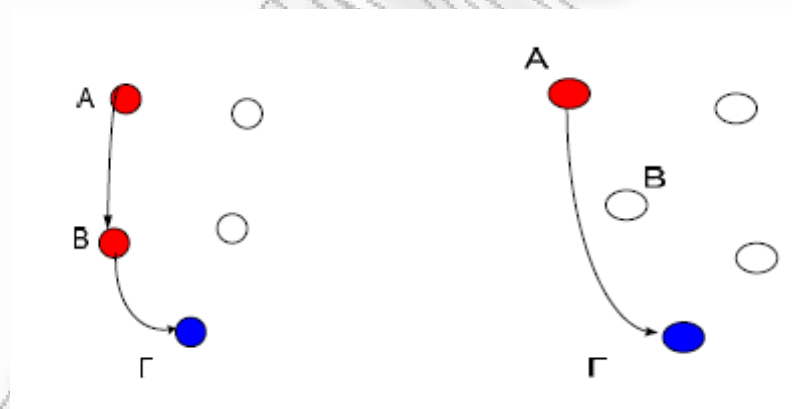
Εικόνα 6: Μοντέλο Επικοινωνίας Δικτύων Αισθητήρων

Η επικοινωνία για την εξυπηρέτηση των εφαρμογών σχετίζεται με τη μεταφορά των δεδομένων που έχουν καταγραφεί με σκοπό την ενημέρωση

του εκάστοτε ενδιαφερομένου για το φαινόμενο που παρακολουθείται. Δύο είναι τα μοντέλα που κυριαρχούν σε αυτή τη μορφή επικοινωνίας. Το πρώτο απαιτεί τη συνεργασία μεταξύ διαφορετικών κόμβων για τη μεταφορά της πληροφορίας στους ενδιαφερόμενους ενώ, το δεύτερο δεν απαιτεί τη συνεργασία για τη μεταφορά πληροφορίας.

Η επικοινωνία υποδομής αναφέρεται σε όλες τις εκπομπές που πρέπει να γίνουν ανάμεσα στους κόμβους και έχουν ως σκοπό την ρύθμιση, συντήρηση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου.

Ειδικότερα, εξαιτίας της ad hoc φύσης των δικτύων αισθητήρων, απαιτείται από τους κόμβους να μπορούν να εντοπίζουν άλλους κόμβους και να αποκαθιστούν επικοινωνία. Έτσι η επικοινωνία υποδομής απαιτείται για τη διατήρηση των συνδέσεων του δικτύου, για την εξασφάλιση του συγχρονισμού ανάμεσα στους κόμβους αλλά και για τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου.



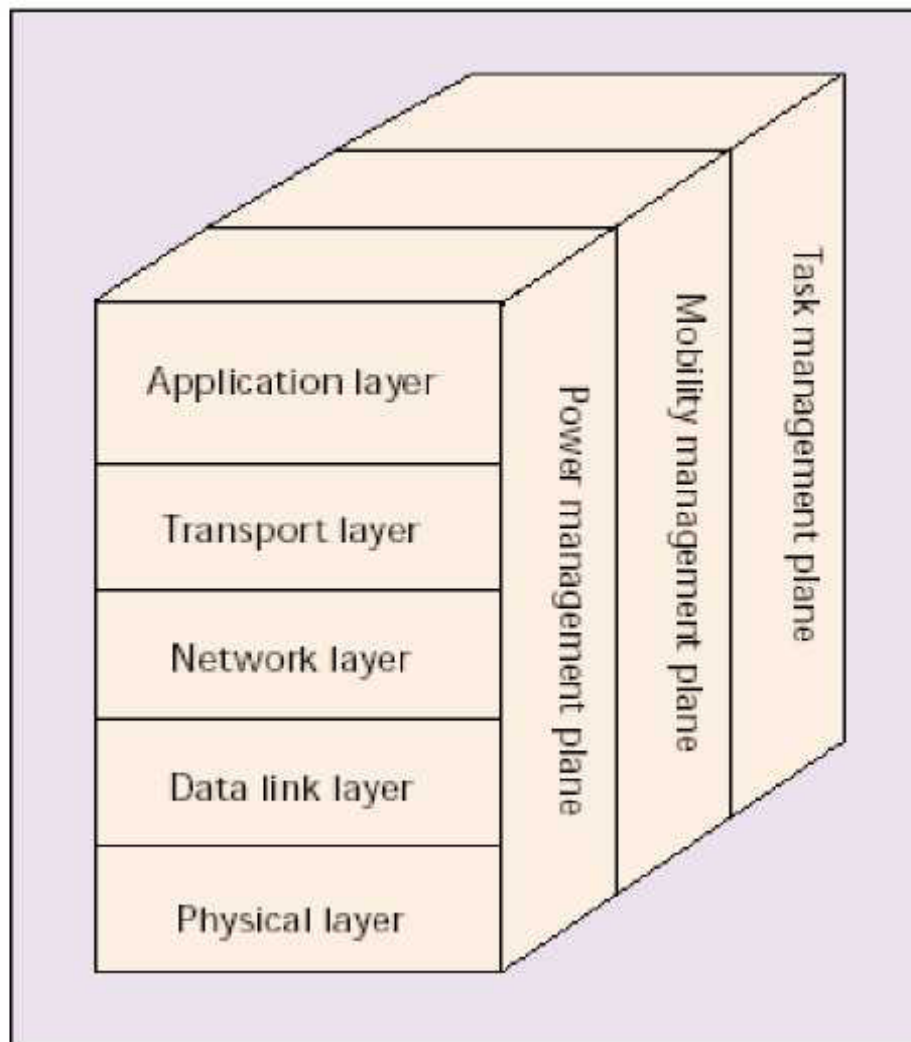
Εικόνα 7: : (α) Συνεργατική (β) Μη - Συνεργατική Μέθοδος Μεταφοράς δεδομένων.

Για την υλοποίηση του παραπάνω μοντέλου συνεργατικής επικοινωνίας απαιτείται η συνεργασία πρωτοκόλλων σε όλο το εύρος της στοίβας που προβλέπει το μοντέλο OSI και ορισμένων επιπλέον 'επιπέδων'. Επιπλέον, στην Εικόνα 1.5 βλέπουμε πώς διαμορφώνεται το πρότυπο του OSI και πώς προστίθενται κάθετα σε αυτό οι επιπλέον στοίβες της ισχύος, της κινητικότητας και της διαχείρισης της κατανομής του φόρτου ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου.

Οι στοίβες αυτές διατρέχουν όλα τα επίπεδα και βοηθούν στο συντονισμό των αισθητήρων με απώτερο σκοπό τη συνολική μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και στην αύξηση της αποδοτικότητας του δικτύου.

Ειδικότερα, η στοίβα διαχείρισης ρυθμίζει τον τρόπο που ένας κόμβος χρησιμοποιεί την ενέργεια του καθώς και τα μηνύματα που ανταλλάσσει με τους γύρω κόμβους σχετικά με την ενεργειακή του κατάσταση.

Η στοίβα διαχείρισης της κινητικότητας είναι υπεύθυνη για τη συνεχή καταγραφή της τοπολογίας του δικτύου και γενικότερα για τον εντοπισμό βέλτιστων διαδρομών σε αυτό.



Εικόνα 8: Τελική μορφή μοντέλου OSI στα Δίκτυα Αισθητήρων

Πηγή: Akylidiz (2002), *A survey on sensor networks*

Η στοίβα διαχείρισης της κατανομής του φόρτου αναλαμβάνει την ευθύνη της κατανομής του φόρτου του δικτύου έχοντας ως κριτήρια την ενεργειακή κατάσταση των κόμβων και τη χωρική διάσταση του συμβάντος που καταγράφεται. Αυτό σημαίνει ότι για μια δοθείσα περιοχή δεν είναι απαραίτητο όλοι οι κόμβοι να καταγράφουν και να εκπέμπουν τα δεδομένα, παρά μόνο οι κόμβοι που βρίσκονται σε καλύτερη κατάσταση από ενεργειακή άποψη. Όπως είναι προφανές η στοίβα διαχείρισης του φόρτου είναι σημαντικός παράγοντας επιτυχίας σε ένα δίκτυο αισθητήρων, διότι η αποτελεσματική εφαρμογή του εξασφαλίζει καλύτερη απόδοση και μεγαλύτερο χρόνο ζωής στο δίκτυο.

1.7 Το ενεργειακό πρόβλημα στα Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

1.7.1 Γενικά

Η πρόοδος της έρευνας σε υλικό (hardware) υψηλής ολοκλήρωσης και χαμηλής ισχύος, στην τεχνολογία των ασύρματων επικοινωνιών, καθώς και στα υψηλής ενσωμάτωσης λειτουργικά συστήματα καθιστούν υλοποιήσιμα τα δίκτυα αισθητήρων. Ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να αποτελείται από αρκετές χιλιάδες κόμβους, καθε ένας με πολύ περιορισμένες δυνατότητες επεξεργασίας, αποθήκευσης, «αίσθησης» και επικοινωνίας.

Συνήθως οι κόμβοι τροφοδοτούνται από μπαταρίες. Εξαιτίας αυτής της περιορισμένης ενεργειακής πηγής, η κατανάλωση ενέργειας είναι ένας κρίσιμος σχεδιαστικός παράγοντας για σχεδιαστές τόσο υλικού, όσο και λογισμικού. Παρόλο, όμως, που υλικό και λογισμικό είναι άρρηκτα συνδεδεμένα στην ανάπτυξη κινητών και ενσωματωμένων συσκευών, η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί δευτερεύων ζήτημα για την ανάπτυξη λογισμικού. Για να γίνει εφικτή μια αποτελεσματική σχεδίαση υλικού και λογισμικού τέτοιων συσκευών, είναι κρίσιμη μια σε βάθος αξιολόγηση εφαρμογών και συστημάτων όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας.

Επιπλέον, στα αμέσως επόμενα χρόνια δεν αναμένονται καινοτομίες στην τεχνολογία των μπαταριών. Όσο νέες τεχνολογίες, όπως τα κύτταρα καυσίμων (fuel cells), δεν περνούν από το επίπεδο του πρωτοτύπου στη μαζική παραγωγή, οι μπαταρίες και άρα η κατανάλωση ενέργειας θα είναι ο περιοριστικός παράγοντας. Οι μπαταρίες συχνά αποτελούν πάνω από το 50% του βάρους και του όγκου όλης της συσκευής. Για παράδειγμα, ο κόμβος του Mica2 ζυγίζει 18 g. Αντίθετα, 2 AA μπαταρίες ζυγίζουν 20-30 gr έκαστη.

Για τους σχεδιαστές, λοιπόν, είναι πολύ σημαντικό να αξιολογήσουν με ακρίβεια την κατανάλωση ενέργειας κάθε εφαρμογής, αφού αυτή μπορεί να επηρεαστεί αρκετά από την επιλογή των αλγορίθμων και της τεχνικής προγραμματισμού. Επιπλέον, άπαξ και οι κόμβοι τοποθετηθούν είναι

δύσκολο και μερικές φορές αδύνατο να αντικατασταθούν οι μπαταρίες. Συνεπώς, λανθασμένη πρόβλεψη του χρόνου ζωής μπορεί να οδηγήσει σε υψηλό κόστος ή ακόμα να καταστήσει ένα δίκτυο αισθητήρων άχρηστο πριν ολοκληρωθεί ο σκοπός της λειτουργίας του.

Έτσι, λοιπόν, στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε ορισμένους συγχρονους τρόπους που έχουν προταθεί για τον υπολογισμό, είτε μέσω hardware, είτε μέσω software, της κατανάλωσης ενέργειας ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

1.7.2 AEON (Accurate Prediction of Power Consumption)

Οι Landsiedel et al. το 2005 παρουσίασαν το AEON ένα τρόπο μοντελοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας ενός δικτύου αισθητήρων που αποτελούταν από κόμβους mica2 ίσως τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα motes. Η ανάλυσή τους βέβαια μπορεί να αναχθεί με κατάλληλες αλλαγές σε όλα τα είδη mote.

Αφού ο κάθε κόμβος αποτελείται από διάφορες συνιστώσες (components), όπως μικροεπεξεργαστές, RF, αισθητήρες και μνήμη, είναι απαραίτητη μια λεπτομερής χαμηλού επιπέδου μοντελοποίηση όλων αυτών, ώστε να γίνει εφικτή μια ακριβής πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας. Η εφαρμογή, αλλά και εξωτερικά γεγονότα επηρεάζουν την εκτέλεση του προγράμματος και την κατάσταση του κόμβου. Για παράδειγμα, μερικές εφαρμογές ανοιγοκλείνουν συσκευές όπως το RF, ενώ διακοπές του χρονομετρητή (timer) αλλάζει τη CPU από κατάσταση «ύπνου» (sleep) σε ενεργή (active). Αφού, λοιπόν, τέτοιες αλλαγές κατάστασης γίνονται συχνά και κάθε κατάσταση καταναλώνει διαφορετικό ποσό ενέργειας, κάθε μια αλλαγή, καθώς και ο χρονισμός της πρέπει να μοντελοποιηθεί επακριβώς. Οι ατομικές καταστάσεις κάθε component όλες μαζί αποτελούν την κατάσταση του κόμβου. Το συνολικό ρεύμα που «τραβάει» ένας κόμβος είναι το άθροισμα των ρευμάτων κάθε component στις αντίστοιχες καταστάσεις.

Αρχικά, η μοντελοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας ενός κόμβου αποτελούταν από τρία βήματα: α) μετρήθηκε η κατανάλωση ρεύματος για

κάθε component σε κάθε κατάσταση για τη ρύθμιση του μοντέλου (calibration), β) το μοντέλο που εξήχθη από τα προηγούμενα υλοποιήθηκε σε ένα προσωμοιωτή κόμβου αισθητήρα και γ) το μοντέλο επιβεβαιώθηκε από μετρήσεις σε παλμογράφο και άλλες για το χρόνο ζωής της μπαταρίας μέσω εφαρμογών του TinyOS.

Στον Πίνακα φαίνονται οι μετρήσεις των τιμών του ρεύματος που καταναλώνει κάθε component ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται.

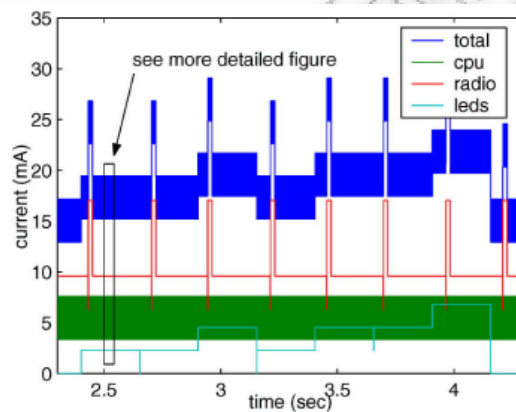
Device	Current	Device	Current
CPU		Radio (900 MHz)	
Active	7.6 mA	Core	60 μ A
Idle	3.3 mA	Bias	1.38 mA
ADC Noise	1.0 mA	Rx	9.6 mA
Power down	116 μ A	Tx (-18 dBm)	8.8 mA
Power Save	124 μ A	Tx (-13 dBm)	9.8 mA
Standby	237 μ A	Tx (-10 dBm)	10.4 mA
Ext Standby	243 μ A	Tx (-6 dBm)	11.3 mA
		Tx (-2 dBm)	15.6 mA
LED (each)	2.2 mA	Tx (0 dBm)	17.0 mA
		Tx (+3 dBm)	20.2 mA
Sensor Board	0.7 mA	Tx (+4 dBm)	22.5 mA
		Tx (+5 dBm)	26.9 mA

Πίνακας 1– Μετρήσεις ρεύματος για το mica2 mote

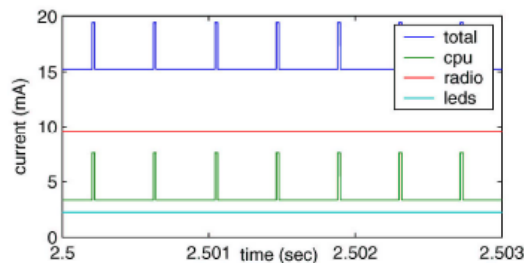
Πηγή: Landsiedel et al., 2005

Στη συνέχεια, με την τεχνική AEON αναλύθηκε η εφαρμογή του TinyOS CntLedsAndRfm, καθώς και διερευνήθηκαν τα κέρδη ενέργειας της Διαχείρισης Ενέργειας (Power Management), του σχήματος λήψης χαμηλής ισχύος (Low Power Listening) και σχηματων δρομολόγησης (routing schemes) του TinyOS.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για την εφαρμογή CntToLedsAndRfm φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί, όπου γαίνεται η επιμέρους κατανάλωση για κάθε component.



(a) Coarse grained view.

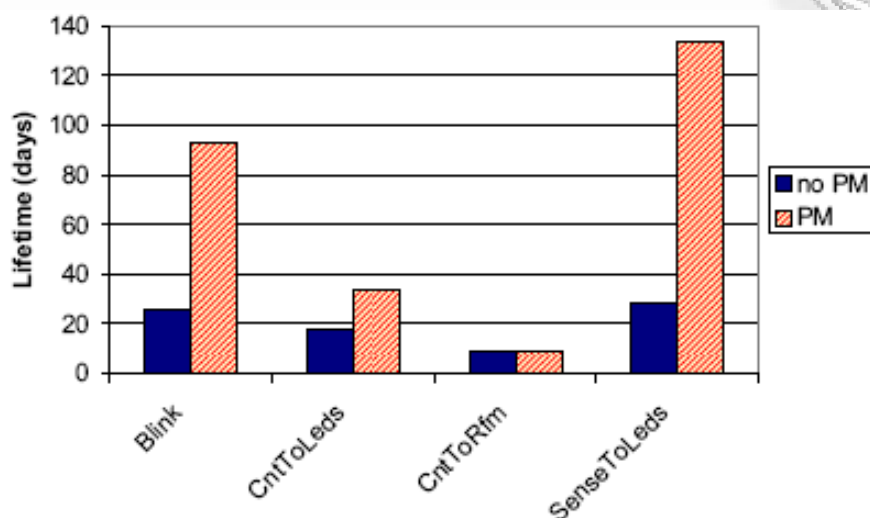


(b) Fine grained view. Spikes are mainly caused by radio interrupts (CPU: change from idle to active mode).

Εικόνα 9: Προβλεπόμενη με το AEON κατανάλωση ρεύματος για κάθε component

Πηγή: Landsiedel et al., 2005

Το TinyOS παρέχει την υλοποίηση HPLPowerManagement για τη διαχείριση της ενέργειας, της οποίας το πλεονέκτημα είναι ότι ρυθμίζει δυναμικά το φορτίο ρεύματος ενός κόμβου. Βασισμένοι σε αυτό χρησιμοποιήθηκε το AEON για να υπολογιστεί η επιμήκυνση του χρόνου ζωής του κόμβου που προσφέρει αυτό το σχήμα σε άλλες εφαρμογές. Τα αποτελέσματα αυτού δίνονται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 10: Προβλεπόμενη επέκταση χρόνου ζωής όταν χρησιμοποιείται Power Management

Πηγή: Landsiedel et al., 2005

Εντούτοις, οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν το RF δεν κερδίζουν απευθείας από την προσέγγιση του power management που περιγράφηκε παραπάνω. Ο μικροελεγκτής του mica2 δεν μπορεί να επανέλθει από καταστάσεις «υπνου» (sleep mode) – εκτός από την άεργη (idle) κατάσταση – με διακοπές RF. Συνεπώς, και δεν μπορεί να περάσει σε sleep mode όταν το RF είναι ανοικτό.

Έτσι, η υλοποίηση Low Power Listening (LPL) μειώνει το duty cycle του RF ανοιγοκλείνοντάς το περιοδικά. Όταν είναι κλειστό, ο μικρο ελεγκτής μπορεί να περάσει σε sleep mode. Για να βεβαιωθεί ότι θα γίνει αξιόπιστη λήψη δεδομένων το μήκος της επικεφαλίδας ισούται με το χρονικό διάστημα που το RF ανοίγει.

Χρησιμοποιώντας χαμηλό duty cycle για το RF, ο χρόνος μεταξύ των διαστημάτων που αυτό είναι ανοικτό είναι μεγάλος, με αποτέλεσμα μεγάλη επικεφαλίδα εκπομπής και άρα μεγάλο χρόνο εκπομπής. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε υψηλή κατανάλωση ενέργειας για τον εκπομπό. Επομένως, χαμηλό duty cycle οδηγεί σε υψηλό ενεργειακό κόστος εκπομπής, ενώ η

λήψη πακέτων δεν απαιτεί υψηλή κατανάλωση, αφού το RF μπορεί να είναι κλειστό για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Το βασικό μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι ότι η δρομολόγηση είναι στατική και εφαρμόζεται η ίδια σε όλους τους κόμβους. Παρολ' αυτά, συνήθως οι περιφερικοί του δικτύου κόμβοι στέλνουν πολύ λιγότερα πακέτα από κομβους κοντά στον σταθμό βάσης. Έτσι, αυτοί οι κόμβοι θα περιμέναμε να καταναλώνουν και λιγότερη ενέργεια.

Γι' αυτό το λόγο, μελετήθηκε και η multihop εφαρμογή Surge, στην οποία τα πακέτα δρομολογούνται από οποιοδήποτε σημείο του δικτύου προς τον σταθμό βάσης με πολλαπλά άλματα (hops). Έτσι, κάθε κόμβος λειτουργεί ταυτοχρόνως και ως δρομολογητής (router).

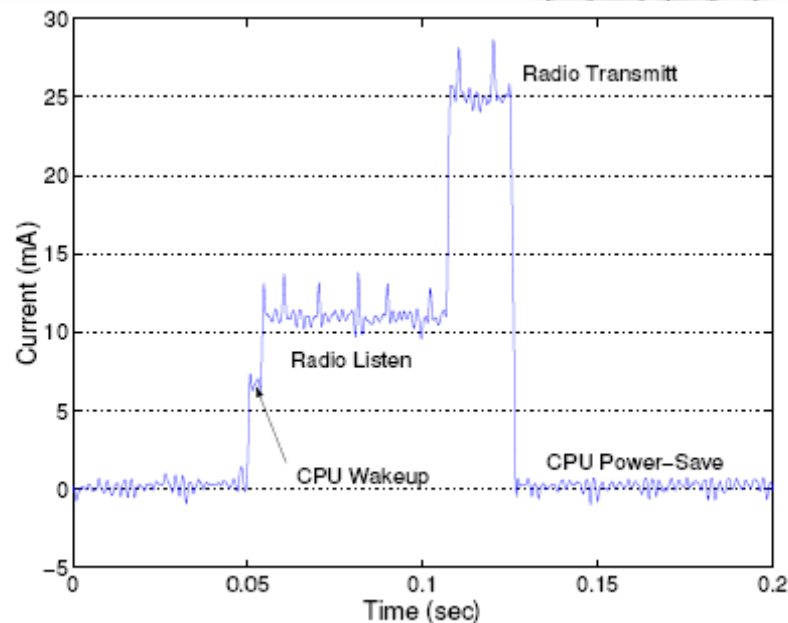
Με τη χρήση των παραπάνω τεχνικών αναλύουμε το χρόνο ζωής του κάθε κόμβου στο δίκτυο και αποφασίζουμε αν η θέση τους στο δίκτυο τον επηρεάζει. Για να έχουμε μια καλή ροή πακέτων τοποθετούμε δώδεκα κόμβους στη σειρά, ώστε ο καθένας να επικοινωνεί μόνο με τον προηγούμενο και τον επόμενο του στη σειρά. Ο κόμβος 0 είναι ο σταθμός βάσης και ο κόμβος 11 ο πιο μακρινός.

Για εκπομπή, επιλέγουμε LPL με 5.7 kbps, αφού το να βάλουμε δώδεκα κόμβους στη σειρά έχει ως αποτέλεσμα ρυθμό επικοινωνίας 4.3 kbps. Οι κόμβοι που βρίσκονται μακριά από τον σταθμό βάσης δρομολογούν λιγότερα πακέτα και έχουν μεγαλύτερες περιόδους σε sleep mode. Συνεπώς, καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια.

1.7.3 Εξομοίωση κατανάλωσης ενέργειας σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας δικτύων αισθητήρων

Στο ίδιο μήκος κύματος με την προηγούμενη πρόταση κινήθηκε και η ομάδα των Schnayder et al. (2004) του πανεπιστημίου του Harvard. Η έρευνά τους είχε να κάνει με διάφορα ζητήματα μέτρησης της κατανάλωσης ενέργειας, τόσο από πλευράς υλικού, όσο και μέσω βοηθημάτων λογισμικού.

Αρχικά, σχεδιάστηκε ένα κύκλωμα μέτρησης που αποτελούσαν από μια αντίσταση αίσθησης 1.03Ω και από ένα ενισχυτή οργάνων. Για τον ενισχυτή προτιμήθηκε το ολοκληρωμένο AD620 που ρυθμίστηκε να δίνει κέρδος τάσης 106. Ένα παράδειγμα μετρούμενου σήματος φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 11: Μέτρηση κατανάλωσης ρεύματος της εκπομπής ενός μηνύματος με μέγιστη ισχύ αποστολής

Πηγή: Landsiedel et al., 2005

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ο ενεργειακός εξομοιωτής του λειτουργικού συστήματος TinyOS, PowerTOSSIM – τον οποίο οι ίδιοι ανέπτυξαν – με σκοπό να αποσπασθούν αποτελέσματα προσομοίωσης για σύγκριση με τα μετρούμενα από το κύκλωμα.

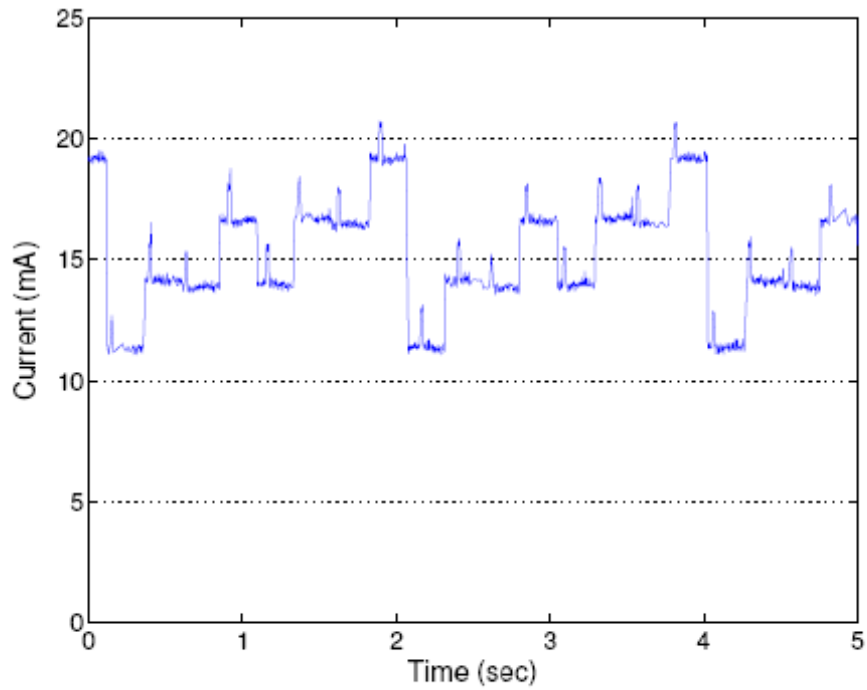
Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των δύο παραπάνω τεχνικών σε διάφορες εφαρμογές του TinyOS δίνονται στον Πίνακα:

Benchmark	Simulated	Measured	Error (%)
Beacon	92.93	106.73	-12.9
Blink	940.26	931.72	0.85
BlinkTask	940.28	917.90	2.5
CntToLeds	1336.49	1330.00	0.45
CntToLedsAndRfm	2620.37	2562.00	2.3
CntToRfm	2028.09	1985.00	2.1
Oscilloscope	867.94	801.60	8.3
OscilloscopeRF	2136.45	2021.90	5.7
Sense	865.59	900.72	-3.8
SenseLightToLog	2133.89	2005.26	6.4
SenseTask	865.62	944.74	-8.3
SenseToLeds	868.70	977.73	-11.1
SenseToRfm	2152.27	2059.16	4.5
Average			4.7
TinyDB (idle)	2001.31	2275.55	-12.1
TinyDB (select light)	2144.86	2465.30	-13.0
Surge	2089.09	2028.40	3.0
Average			9.5

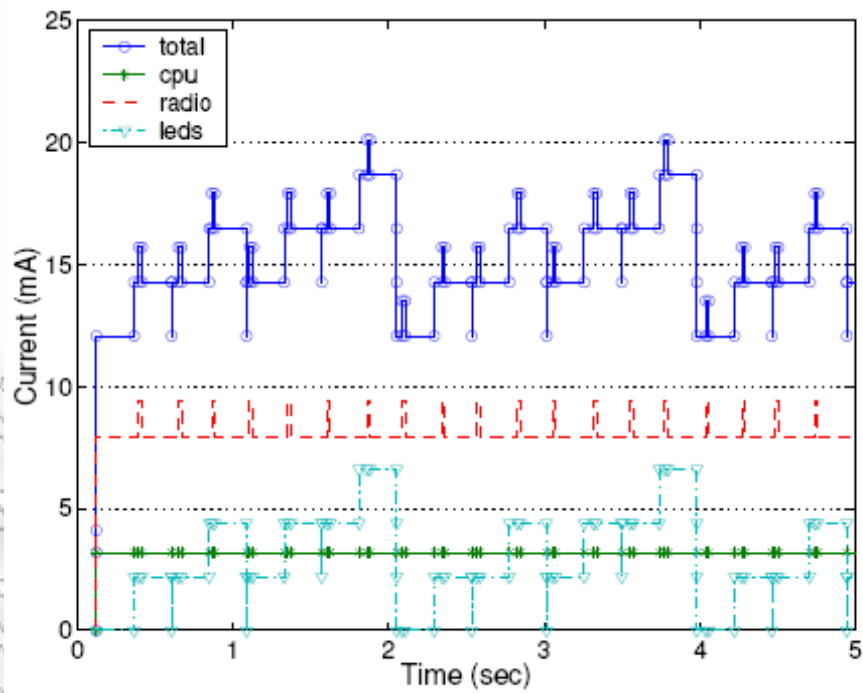
Πίνακας 2: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μέτρησης για διάφορες εφαρμογές ύστερα από αντίστοιχο χρόνο 60 λεπτών. Όλες οι τιμές ενέργειας σε millijoules.

Πηγή: Landsiedel et al., 2005

Ακολουθεί σύγκριση μέτρησης και εξομοίωσης για την εφαρμογή CntToLedsAndRfm στην επόμενη εικόνα.



(a) Measured



(b) Simulated

Εικόνα 12: Κατανάλωση ρεύματος για την εφαρμογή CntToLedsAndRfm

Πηγή: Landsiedel et al., 2005

1.7.4 SPOT (Scalable Power Observation Tool)

Μια πρόσφατη εργασία των Jiang et al. Το 2007 ασχολείται με την υπερπήδηση ορισμένων από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι σχεδιαστές πάνω στη μέτρηση της ενέργειας που καταναλώνουν οι κόμβοι ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Τα προβλήματα αυτά είναι σε συντομία τα εξής :

➤ *Δυναμικό Εύρος (Dynamic Range)* : με τον όρο αυτό εννοούμε το γεγονός ότι κάθε εφαρμογή έχει διαφορετικό μοντέλο ενέργειας, αφού διαφορετικά ποσά ρεύματος καταναλώνει μια εφαρμογή sense-and-send, που αφού λάβει την ένδειξη του αισθητήρα την στέλνει, από μια εφαρμογή sense-and-store, η οποία απλά αποθηκεύει την ένδειξη και μπορεί να τη στείλει αργότερα. Έτσι, το κύκλωμα μέτρησης θα πρέπει να μπορεί να μετρήσει ρεύματα από λίγα μA μέχρι αρκετές περίπου 30 mA.

➤ *Ρυθμός Δειγματοληψίας (Sampling Rate)* : το πρόβλημα εδώ βρίσκεται στο ότι ο ρυθμός δειγματοληψίας του κυκλώματος μέτρησης θα πρέπει να είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο ενεργό παλμό (active pulse) του κόμβου. Αυτό πρέπει να ισχύει για να μη χαθεί κάποια μέτρηση.

➤ *Διατάραξη μέτρησης (Perturbation)* : εννοούμε ότι το κύκλωμα μέτρησης δεν πρέπει να προσθέτει τη δική του κατανάλωση στην ενέργεια την οποία μετράει. Οπότε, θα πρέπει να έχει ξεχωριστή τροφοδοσία.

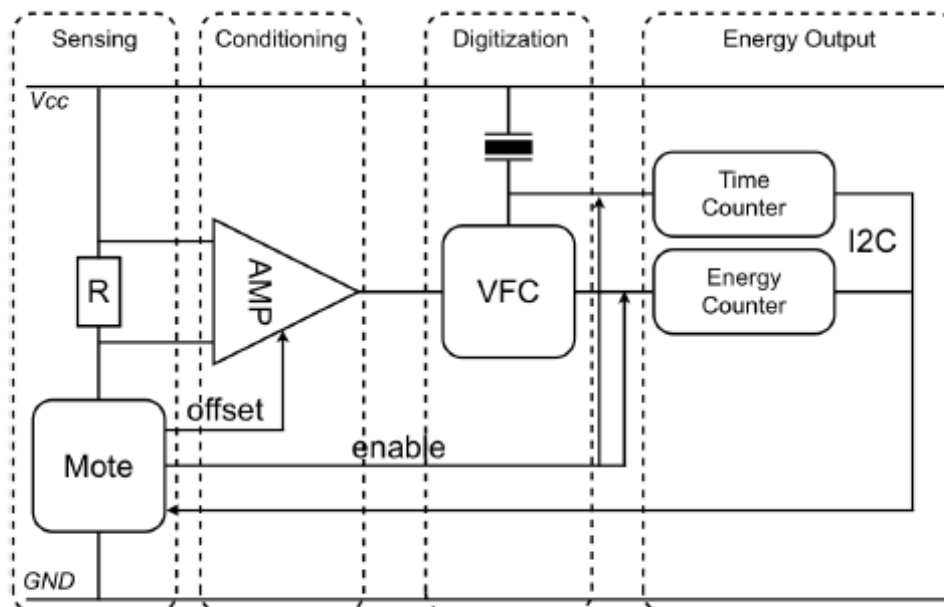
➤ *Ευκολία Ολοκλήρωσης (Ease-of-Integration)* : κάθε κόμβος του δικτύου θα πρέπει να έχει το δικό του κύκλωμα μέτρησης και, άρα, το κύκλωμα αυτό θα πρέπει να έχει μέγεθος, αλλά και κόστος συγκρίσιμο με εκείνο του κάθε κόμβου.

Έχοντας, λοιπόν, στο μυαλό τους τα τέσσερα αυτά βασικά ζητήματα, οι Jiang et al. ανέπτυξαν ένα κλιμακωτό εργαλείο για την παρατήρηση της ισχύος (SPOT), το οποίο επιτρέπει in situ μέτρηση της ισχύος και της ενέργειας ενός κόμβου με δυναμικό εύρος 10000:1 και χρονική ανάλυση της τάξης των μsec . Το SPOT συσσωρεύει το ρεύμα εσωτερικά και εξάγει

γραμμές εισόδου/εξόδου (I/O) για να απ/ενεργοποιήσει τη μέτρηση και βαθμονόμηση, αναλογικές γραμμές για μέτρηση στιγμιαίου ρεύματος και μια διασύνδεση (Interface) I2C για να διαβάζει το συσσωρευμένο ρεύμα (ενέργεια) και να μηδενίζει το μετρητή.

Στην εικόνα δίνεται ένα διάγραμμα της αρχιτεκτονικής του, όπου φαίνονται τα συστατικά του κυκλώματος, που είναι κατά σειρά τα εξής:

- Αίσθηση (Sensing)
- Ενίσχυση – Προετοιμασία (Amplification – Conditioning)
- Ψηφιοποίηση (Digitization)
- Έξοδος Ενέργειας (Energy Output)

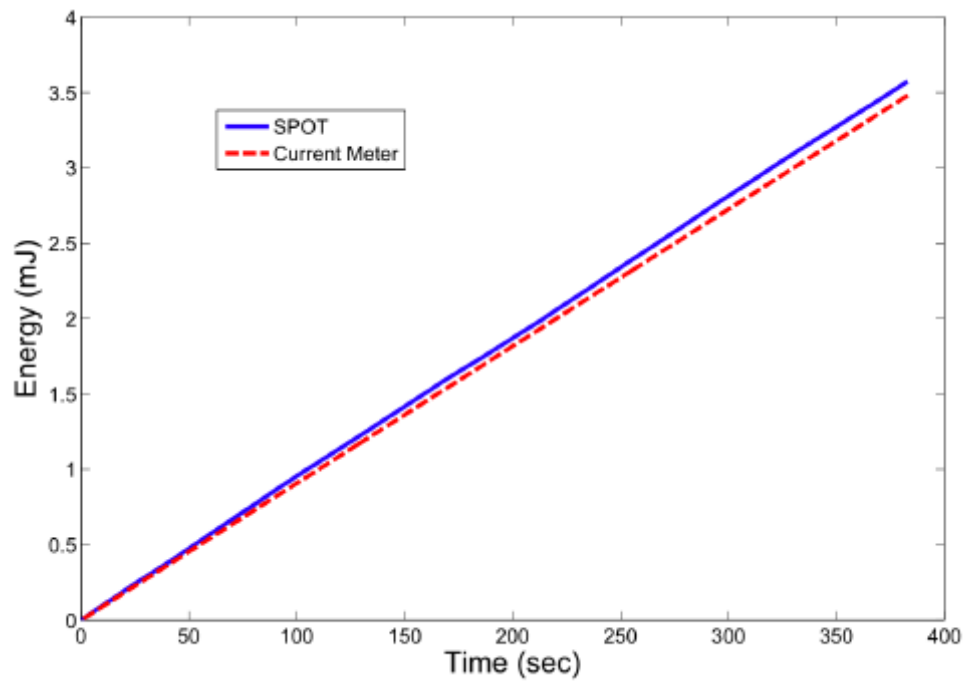


Εικόνα 13: Η αρχιτεκτονική και τα βασικά συστατικά του SPOT

Πηγή: Jiang et al., 2007

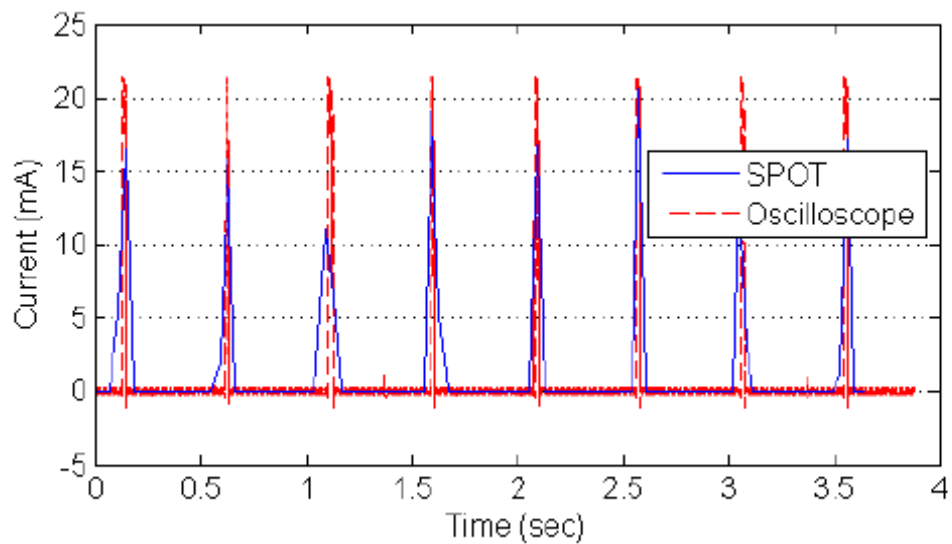
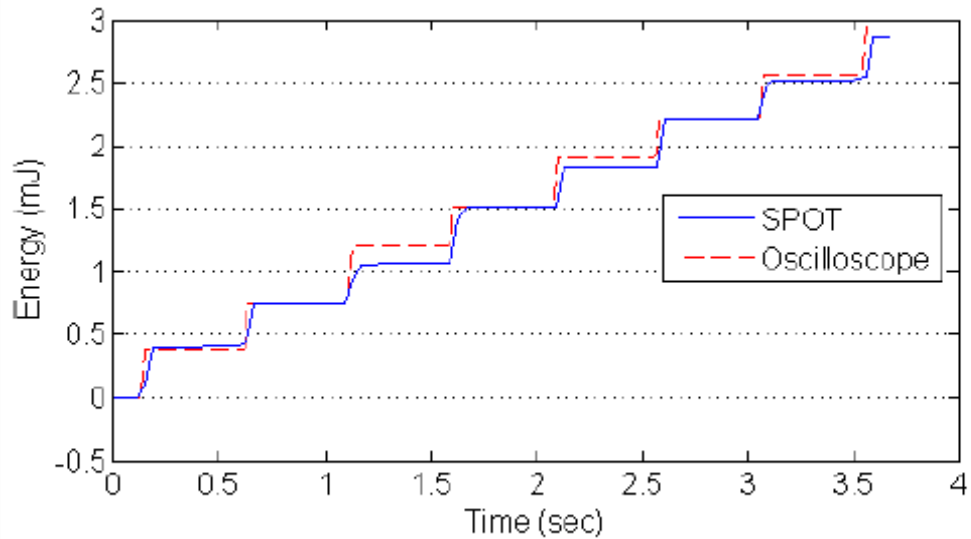
Αν δούμε, στη συνέχεια, τα αποτελέσματα από το SPOT θα παρατηρήσουμε ότι η σύγκλιση τόσο σε χαμηλά, όσο και σε υψηλά ρεύματα

είναι πάρα πολύ καλή. Εποπτικά, μπορούμε να το επιβεβαιώσουμε με τις δύο επόμενες εικόνες.



Εικόνα 14: Μέτρηση ενέργειας φορτίου 9.09 μA για χρόνοπάνω από 7 λεπτά. Η απόκλιση είναι 0.1 mJ ή 3% της πραγματικής ενέργειας

Πηγή: Jiang et al., 2007



Εικόνα 15: Μέτρηση ενέργειας και ισχύος ενός TelosB mote χρησιμοποιώντας το SPOT και ένα παλμογράφο ψηφιακής αποθήκευσης. Στο πάνω γράφημα, τα επίπεδα τμήματα δίνουν την ενέργεια που καταναλώθηκε κατά τη διάρκεια sleep mode, ενώ οι απότομες ανυψώσεις ενδιάμεσα καταναλώσεις σε active mode. Το κάτω γράφημα δείχνει την κατανάλωση ρεύματος (ισχύος) από το SPOT σε καταστάσεις διαρκούς αλλαγής κατανάλωσης ενέργειας.

Πηγή: Jiang et al., 2007

1.7.5 Εκτίμηση ενέργειας κομβών αισθητήρων με χρήση ενεργειακού μοντέλου

Στα πλαίσια του υπολογισμού, αλλά και τις βελτιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων ενός δικτύου αισθητήρων, η ερευνητική ομάδα των Dunkels et al. το 2007 προτείνουν μια μέθοδο που βασίζεται σε επέμβαση λίγων γραμμών στο ήδη υπάρχον λογισμικό με βάση ένα θεωρητικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό στηρίζεται στο γεγονός της διαφορετικής κατανάλωσης ρεύματος από τα διαφορετικά components ενός node και στο ότι το περιοδικό ή μη άνοιγμα/κλείσιμο αυτών μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ενέργεια που καταναλώνεται.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι το εξής :

$$\frac{E}{V} = I_m t_m + I_l t_l + I_t t_t + I_r t_r + \sum_i I_{c_i} t_{c_i},$$

Όπου I είναι το ρεύμα, t ο χρόνος και οι δείκτες σημαίνουν αντίστοιχα

m : μικροεπεξεργαστής

l : μικροεπεξεργαστής σε λειτουργία χαμηλής ισχύος

t : η συσκευή επικοινωνίας σε λειτουργία μετάδοσης

r : η συσκευή επικοινωνίας σε λειτουργία λήψης

c : οι υπόλοιπες συσκευές, όπως οι αισθητήρες, τα LEDs κτλ.

Ο τύπος δεν περιέχει όρο για το ρεύμα στην άεργη (idle) κατάσταση, αφού αυτό συμπεριλαμβάνεται από το ρεύμα του μικροεπεξεργαστή σε λειτουργία χαμηλής ισχύος. Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις η τάση δεν χρειάζεται να υπολογιστεί, αφού αν όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια τάση, οι λόγοι E/V μπορούν να συγκριθούν απ'ευθείας.

Ο μηχανισμός αυτός εφαρμόστηκε στο λειτουργικό σύστημα Contiki, αλλά εύκολα μπορεί να μεταφερθεί και σε άλλα συστήματα. Η υπομονάδα (module) περιέχει έναν πίνακα με καταχωρήσεις για όλα τα components, τη

CPU και το RF. Κάθε καταχώρηση περιέχει πόσο χρόνο το αντίστοιχο component ήταν ανοιχτό.

Η εκτίμηση της ενέργειας υλοποιείται με δύο γραμμές κώδικα στο driver της συσκευής. Όταν αυτή ανοίγει καλείται το module της ενεργειακής εκτίμησης και παράγει ένα χρονικό αποτύπωμα. Όταν κλείνει, υπολογίζεται η χρονική διαφορά από τη στιγμή που άνοιξε. Έπειτα, η τελευταία προστίθεται στην αντίστοιχη καταχώρηση του πίνακα.

1.7.6 Μελέτη κατανάλωσης ενέργειας χρησιμοποιώντας μια μονάδα bit-meter-per-Joule

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε στη μελέτη του J.L.Gao από το 2002, ο οποίος παρουσίασε έναν επιπέδου-συστήματος χαρακτηρισμό της κατανάλωσης ενέργειας ενός ad hoc ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Αρχικά, όρισε τα κατάλληλα για το πεδίο εφαρμογών του δικτύου μοντέλα δρομολόγησης, καναλιού και ισχύος εκπομπής βασισμένος στην τεχνολογία RF επικοινωνιών. Έπειτα, εξήγε τη μονάδα μέτρησης bit-meter-per-joule σε ένα ραδιοφωνικό δίαυλο. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η ίδια μετρική για να αποκτηθεί μια μακροσκοπική προσέγγιση της ολικής κατανάλωσης τοποθεσίας του σταθμού βάσης, της πυκνότητας κόμβων και του όγκου της κίνησης. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε η απόδοση σε ένα δίκτυο ανεπτυγμένο σε τετράγωνη περιοχή με ένα στατικό ή κινητό σταθμό βάσης. Θα αναφέρουμε απ' ευθείας τα συμπεράσματα, αφού η περαιτέρω ανάλυση ξεφεύγει από το σκοπό της εργασίας αυτής. Αυτά είναι :

A) Η ιδανική απόσταση αναμετάδοσης ελέγχεται από την εξισορρόπηση (trade-off) ανάμεσα στη διασπορά των απωλειών και τη δεδομένη ενέργεια για τη λειτουργία του πομποδέκτη. Κάτω από αντίξοες συνθήκες στο δίαυλο, μια μετρική watt-per-meter ευνοεί κοντινές αναμεταδόσεις και, άρα, απαιτείται υψηλή πυκνότητα κόμβων.

B) Η ιδανική θέση για το σταθμό βάσης είναι κοντά στο κέντρο του δικτύου αν η κατανομή της κίνησης είναι ομοιογενής. Αλλιώς, τείνει να μετακινείται προς τα εκεί που η κίνηση είναι πιο συγκεντρωμένη – ο βαθμός

της μετακίνησης εξαρτάται από το βαθμό της συγκέντρωσης της κίνησης και την τοποθεσία που έχει μέγιστο.

Γ) Αν ο σταθμός βάσης είναι κινητός, η χρήση μικρών ομάδων (clusters) ή υποδικτύων αισθητήρων αντί για ένα μεγάλο συνδεδεμένο δίκτυο μπορεί να μειώσει το επικοινωνιακό κόστος, ενώ ταυτόχρονα να παράσχει κάλυψη στην ίδια φυσική περιοχή. Εντούτοις, ο σταθμός βάσης θα αποκτήσει το επιπλέον κόστος της κινητικότητας.

Δ) Η μέση κατανάλωση ενέργειας είναι κατά πολύ μεγαλύτερη για κόμβους που βρίσκονται κοντά στον σταθμό βάσης από ότι για αυτούς στο εξωτερικό του δικτύου. Αυτή η ανισορροπία μπορεί να επιδεινώσει της συνδεσιμότητα και το χρόνο ζωής του δικτύου. Τεχνικές όπως η προνομιακή εκχώρηση πόρων (preferential resource provisioning), δηλ. η αύξηση της πυκνότητας κόμβων ή αύξηση ενεργειακών πόρων κοντά στον σταθμό βάσης, η διαίρεση του δικτύου (network partitioning), δηλ. η χρήση κινητού σταθμού βάσης που να επισκέπτεται κάθε υποδίκτυο με τη σειρά, και η συσσώρευση και η συμπίεση της πληροφορίας μπορούν να βοηθήσουν να αντισταθμιστεί αυτή η ανισορροπία.

2 Πλατφόρμες αισθητήρων και ο κόμβος mote – iv

2.1 Η εξέλιξη στο υλικό και το λογισμικό των πλατφορμών

Η πρόσφατη έρευνα και ανάπτυξη των πλατφορμών 1ης γενιάς ασύρματων δικτύων αισθητήρων επαναπροσδιορίζεται για να βοηθήσει τους μηχανικούς συστημάτων να ορίσουν μια νέα γενιά υλικού που θα εξυπηρετεί καλύτερα τις ανάγκες των δικτύων.

Αναλύοντας την εξέλιξη στο υλικό των δικτύων αισθητήρων πρέπει να τονίσουμε την επίδραση του νόμου του Moore, στο σχεδιασμό και την εξέλιξη των δικτύων. Για όλες τις κατηγορίες πλατφορμών, εκτός από τις μονάδες αισθητήρων ειδικού σκοπού, ο νόμος του Moore εγγυάται αύξηση της απόδοσης για δεδομένη ισχύ. Η μονάδα Mica2 έχει σχεδόν οχταπλάσια μνήμη και εύρος ζώνης επικοινωνίας από τον προκάτοχό του, τη μονάδα Rene, σχεδιασμένη το 1999, παρότι έχουν ίδια ισχύ και κόστος. Οι συσκευές κατηγορίας πύλης (gateway devices) και μεγάλου εύρους ζώνης (high-bandwidth devices) έχουν επιτύχει παρόμοια άλματα απόδοσης, χωρίς σημαντική αλλαγή στις απαιτήσεις ισχύος και κόστους. Αντίθετα, οι μονάδες αισθητήρων ειδικού σκοπού, όπως είναι η μονάδα Spec, χρησιμοποιούν προχωρημένες τεχνικές που απορρέουν από το νόμο του Moore, για να μειώσουν την κατανάλωση ισχύος και το κόστος, ενώ διατηρούν την ίδια απόδοση.

Μέρος της αυξημένης απόδοσης των μονάδων αισθητήρων γενικευμένης τάξης οφείλεται στους νέους CMOS ραδιοπομπούς, που έχουν σχεδιαστεί για εκπομπή χαμηλού ρυθμού και χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Επιπλέον της αύξησης της απόδοσης των πομπών, οι διεπαφές επικοινωνίας που παρέχονται από πομπούς χαμηλής ισχύος, περιλαμβάνουν τώρα εξειδικευμένη υποστήριξη υλικού για να βοηθήσουν στη μείωση του υψηλού φόρτου της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας. Ελεγκτές χαμηλής ισχύος μπορούν να στείλουν δεδομένα μέσω RF καναλιού, με πολλαπλάσιες ταχύτητες των πομπών της προηγούμενης γενιάς. Επιπρόσθετα, προηγούμενοι σχεδιασμοί υλικού

χρησιμοποιούσαν τον μικροελεγκτή για να καθορίζει τον κύκλο λειτουργίας του πομπού και να ελέγχει για δραστηριότητα στο κανάλι. Οι επόμενης γενιάς πομποί έχουν ενσωματωμένους μηχανισμούς που εκτελούν αυτόματα αυτή τη λειτουργία.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΑΙΑ

2.2 Πρότυπα λογισμικού και διεπαφών

Μηχανικοί και ερευνητές που δραστηριοποιούνται στο χώρο της ασύρματης τεχνολογίας χαμηλής ισχύος χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο το πρότυπο 802.15.4. Το πρότυπο αυτό παρέχει μια προδιαγραφή του καναλιού RF και του πρωτοκόλλου σηματοδότησης. Το πρωτόκολλο Zigbee, που βασίζεται πάνω στο 802.15.4, είναι μια προδιαγραφή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας συσκευών σε επίπεδο εφαρμογής και θα περιγράφει αναλυτικά στη συνέχεια. Για να εισάγουμε το Zigbee και το 802.15.4 στη λογική των πλατφορμών που μελετάμε εδώ, το 802.15.4 αποφασίζει ποιο υλικό ασύρματης επικοινωνίας θα χρησιμοποιηθεί και το Zigbee καθορίζει το περιεχόμενο των μηνυμάτων που μεταδίδονται από κάθε μονάδα δικτύου. Ακολουθώντας τη διαθεσιμότητα των πρώτων 802.15.4 πομπών στις αρχές του 2004, οι ερευνητές αποφάσισαν να αναπτύξουν τους TinyOS οδηγούς, ώστε οι υπάρχουσες εφαρμογές να μπορέσουν να εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες των 802.15.4 στοιχείων (chips).

Μολονότι η διαδικασία προτυποποίησης προοδεύει, δεν είναι σίγουρο αν ένα σύνολο τυποποιημένων πρωτοκόλλων θα είναι κάποτε ικανό να ικανοποιήσει όλες τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Αντίθετα με τις παραδοσιακές εφαρμογές Internet, που σχεδόν όλες χρησιμοποιούν πρωτόκολλα TCP/IP, οι εφαρμογές του δικτύου αισθητήρων απαιτούν πρωτόκολλα που είναι βελτιστοποιημένα για τα μοναδικά τους σχήματα επικοινωνίας (communication patterns). Σε αυτό το περιβάλλον, η ικανότητα του TinyOS να επιτρέπει σε όσους αναπτύσσουν εφαρμογές να συγκεντρώνουν πρωτόκολλα από ανεξάρτητα δίκτυα, θα συνεχίσει να είναι η προτιμώμενη στρατηγική ανάπτυξης δικτύων αισθητήρων.

Το πρωτόκολλο Zigbee παρέχει ένα ανοικτό πρότυπο ασύρματης δικτύωσης χαμηλής ισχύος, για παρακολούθηση και έλεγχο συσκευών. Χρησιμοποιώντας το πρότυπο IEEE 802.15.4 - που επικεντρώνεται σε δικτύωση χαμηλών ταχυτήτων και ορίζει τα πρωτόκολλα χαμηλών επιπέδων, όπως είναι π.χ. το φυσικό επίπεδο (PHY) και επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) – το Zigbee ορίζει τα ανώτερα επίπεδα της στοίβας

πρωτοκόλλων, από το επίπεδο δικτύου έως της εφαρμογής, περιλαμβάνοντας κατανομές εφαρμογής (application profiles). Μπορούμε να φανταστούμε το 802.15.4 σαν το φυσικό ραδιοστρώμα και το Zigbee σαν το λογισμικό λογικού δικτύου και εφαρμογών. Το Zigbee χρησιμοποιεί την ISM (Industrial, Scientific and Medical) ζώνη συχνοτήτων, που επιτρέπει απεριόριστη γεωγραφική χρήση.

Το πρωτόκολλο Zigbee αποσκοπεί σε εφαρμογές κτιριακού ελέγχου, στον αυτοματισμό, την ασφάλεια, τα ηλεκτρονικά προϊόντα, τα περιφερειακά Η/Υ, την ιατρική παρακολούθηση και τα παιχνίδια. Οι εφαρμογές αυτές απαιτούν τεχνολογία που επιτρέπει τροφοδότηση με μπαταρίες μεγάλης διάρκειας, αξιοπιστία, αυτόματα ή ημιαυτόματα εγκατάσταση, την δυνατότητα εύκολης προσθήκης ή απομάκρυνσης κόμβων, καθώς και συστήματα χαμηλού κόστους.

Το Zigbee και το υποκείμενο πρότυπο 802.15.4, προσφέρουν στο σχεδιαστή του συστήματος συσκευές διαφόρων τάξεων: τη συσκευή μειωμένης λειτουργικότητας (reduced-functionality device, RFD), τη συσκευή πλήρους λειτουργικότητας (full functional device, FFD) και το συντονιστή δικτύου (network coordinator). Όλα τα Zigbee δίκτυα έχουν τουλάχιστον μία από τις παραπάνω συσκευές. Οι περισσότερες εφαρμογές αισθητήρων τοποθετούνται στην RFD κατηγορία, με τα εκτεταμένα δίκτυα να χρησιμοποιούν τόσο τις συσκευές FFD όσο και τους συντονιστές δικτύου προκειμένου να δημιουργήσουν τις απαραίτητες, για την τοπολογία του δικτύου, συνδέσεις. Τα δίκτυα Zigbee σχηματίζονται αυτόνομα, βασισμένα στη συνδεσιμότητα και τη λειτουργία.

2.2.1 Τροφοδοσία

Ένας ασύρματος κόμβος δικτύων αισθητήρων, όπως σε οποιοδήποτε υπολογιστή γενικού σκοπού, αποτελείται από επεξεργαστή, μνήμη αποθήκευση, συσκευές επικοινωνίας, και συσκευές εισόδου εξόδου. Αλλά, "ασύρματο" δεν αναφέρεται στις επικοινωνίες αλλά ισχύει και για την πηγή ενέργειας. Το πιο σημαντικό κομμάτι του ασύρματου κόμβου δικτύων

αισθητήρων είναι η συσκευή ενεργειακής αποθήκευσης, συνήθως μια μπαταρία. Πάνω από όλα είναι η συνειδητοποίηση αυτής της πεπερασμένης ενεργειακής πηγής που οδηγεί τον σχεδιασμό του υπόλοιπου συστήματος. Οι ασύρματες συσκευές ενεργειακής σάρωσης μπορούν να βοηθήσουν στην παράταση του ενεργειακού αποθέματος, αλλά το εύρος επέκτασης δικτύων αισθητήρων διαμορφώνεται τελικά από το ποσό ενέργειας που διαθέτει κάθε κόμβος. Όταν η ενέργεια τελειώσει, είτε η εφαρμογή σταματά είτε κάποιο πρόσωπο πρέπει να σταλεί επί τόπου για να ανανεώσει της πηγές, και επίσης να συλλέξει τα δεδομένα.

Αρχίζουμε με την εξέταση των διαθέσιμων επιλογών ενεργειακής αποθήκευσης. Η βασική αλκαλική μπαταρία AA αποθηκεύει 2850 ώρες μA ενέργειας. Ένας λαμπτήρας LED καταναλώνει περίπου 6 mA ρεύματος. Αυτός ο λαμπτήρας θα παραμείνει αναμμένος για περίπου 20 ημέρες, και προς το τέλος αυτού του χρονικού διαστήματος, θα γίνει πιο αμυδρός ο φωτισμός όσο η τάση πέφτει κάτω από 1,5 βολτ. Τώρα εξετάζουμε την απλούστερη και αποτελεσματικότερη μορφή εναλλακτικής ενέργειας, την ηλιακή. Ένα αντιπροσωπευτικό φωτοβολταϊκό επιφάνειας 30cm^2 μπορεί να παραγάγει ρεύμα 40 mA σε 4,8 βολτ, και περίπου $6\text{ mW}/\text{cm}^2$ με άμεσο φως του ήλιου. Αυτό απέχει από το συνολικό ποσό διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας, περίπου $100\text{ mW}/\text{cm}^2$, αλλά η αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών μονάδων αυξάνει.

Πόση ενέργεια χρειάζονται αυτές οι συσκευές; Καθώς οι σχεδιαστές μικροεπεξεργαστών έχουν κατανοήσει το κενό μπαταρίας-χαμηλής ενέργειας το ρεύμα που απαιτούν οι επεξεργαστές μειώνεται. Ο μικροελεγκτής του Tmote MSP430 έχει ενεργό ρεύμα λειτουργίας 3 mW , αρκετό να τρέξει για έναν μήνα ή δύο στις τυποποιημένες μπαταρίες AA.

Αλλά, αυτό αγνοώντας το κόστος ραδιοεκπομπής. Μεταδίδοντας ένα μήνυμα, ο πομπός καταναλώνει ισχύ 35 mW , και αυτό το κόστος έχει παραμείνει κατά προσέγγιση σταθερό στη διάρκεια των ετών. Η ενέργεια που απαιτείται για να μεταδοθεί σε μια δεδομένη απόσταση d ανάλογη προς d^n , όπου το n ποικίλλει. Η ασύρματη μετάδοση απαιτεί πολλή ενέργεια, αλλά, δεν γίνεται συνεχώς.

Εντούτοις, η λήψη γίνεται συνέχεια. Επιπλέον, δεδομένου ότι οι πομποί έχουν γίνει πιο σύνθετοι, το κόστος λήψης για ένα μήνυμα έχει αυξηθεί δραστικά. Το radio που χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα motes UCB καταναλώνει 9 mW ισχύ περιμένοντας τα μηνύματα. Στα νεότερα motes καταναλώνει 38 mW ισχύος κατά τη λήψη. Το πραγματικό ενεργειακό κόστος της ασύρματης επικοινωνίας δεν είναι στη μετάδοση αλλά στην αναμονή λήψης.

Το συμπέρασμα από την εξέταση των σχετικών ενεργειακών δαπανών του επεξεργαστή και του πομπού είναι ότι για επεξεργασία μιας εντολής (instruction) του CPU με κατανάλωση ισχύος 3 mW σε ένα ρολόι 4MHz απαιτούνται 0,75 nJ ανά εντολή. Για την αποστολή ή λήψη ενός bit για κατανάλωση 35 mW σε ρυθμό 250kbit/ανα κανάλι απαιτούνται 140 nJ ανά εντολή, περίπου 200 φορές περισσότερη ενέργεια. Η λειτουργία του πομπού στοιχίζει πολύ πιο ακριβά ενεργειακά σε σχέση με την επεξεργασία άρα όπου είναι δυνατό χρησιμοποιούμε την επεξεργασία για να ελαττώσετε τον χρόνο εκπομπής εξοικονομώντας έτσι τεράστια ενέργεια. Αυτό εξυπακούει επεξεργασία μέσα στο δίκτυο, συμπίεσης των δεδομένων, και χρήση της λογικής επεξεργασίας των στοιχείων μέσα στα motes αντί να στέλνει τα ακατέργαστα στοιχεία. Φυσικά, αυτές οι λύσεις εισάγουν τις δικές τους περιπλοκές. Όταν εξετάζουμε το συνδυασμένο κόστος λειτουργίας της πλατφόρμας, 3mW για τον επεξεργαστή και 38 mW για τον ραδιοπομπό, ένα πράγμα γίνεται προφανές. Το συνολικό κόστος 41 mW θα εξαντλήσει ένα ζευγάρι μπαταρίες AA σε μια εβδομάδα. Σαφώς, αυτό είναι πάρα πολύ σύντομο για μια αποτελεσματική υλοποίηση WSN. Ο προτεινόμενος προτείνουν ότι ο ελάχιστος οικονομικώς αποδοτικός χρόνος εφαρμογής για χρησιμοποίηση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι ένα με δύο έτη.

Σε πολλές εφαρμογές, δεν είναι εύκολη η συχνή αλλαγή του στοιχείου τροφοδοσίας (μπαταρία) του αισθητήρα. Ο βασικός 802.15.4 κόμβος είναι σημαντικά αποτελεσματικός όσον αφορά την απόδοση της μπαταρίας. Η διάρκεια της μπαταρίας από λίγους μήνες μπορεί να φτάσει τα πολλά χρόνια, όταν στο σύστημα υπάρχουν κόμβοι που εξοικονομούν ενέργεια και παράμετροι δικτύου που βελτιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας, όπως είναι η σήμανση διαλειμμάτων (beacon intervals), οι καθορισμένες

χρονοθυρίδες (guaranteed time slots) και οι δυνατότητες ενεργοποίησης/απενεργοποίησης (enablement/disablement options).

Η υλοποίηση του δικτύου παίζει επίσης σημαντικό ρόλο. Τα περισσότερα δίκτυα θεωρούνται ότι έχουν δομή τύπου αστέρα (star) ή συστοιχίας δέντρων (cluster trees), παρά πραγματικού βροχωτού δικτύου (mesh network) επιτρέποντας στις ανεξάρτητες συσκευές να εξοικονομούν ενέργεια. Για μεγαλύτερα φυσικά περιβάλλοντα, ο τύπος 'συστοιχία δέντρων' είναι ένας καλός τρόπος να συγκεντρώνονται πολλαπλά δίκτυα τύπου αστέρα σε ένα ευρύτερο δίκτυο. Κάποιες εφαρμογές κάνουν χρήση της βροχωτής (mesh) δομής, που παρέχει ευελιξία στην αλλαγή δρομολόγησης και τη δυνατότητα στο δίκτυο να επανορθώνεται μόνο του όταν ενδιάμεσοι κόμβοι απομακρύνονται ή τα RF μονοπάτια αλλάζουν.

2.3 Η ασύρματη πλατφόρμα Tmote Sky

Η πλατφόρμα που χρησιμοποιήσαμε στην εφαρμογή μας είναι η πλατφόρμα Tmote Sky από την εταιρεία Moteiv. Το tmote-sky είναι μια ασύρματη μονάδα ("mote") πολύ χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, για χρήση σε δίκτυα αισθητήρων και σε εφαρμογές καταγραφής και παρακολούθησης σχεδιασμένες με σκοπό τόσο την ανεκτικότητα στο θόρυβο όσο και την ευκολία περαιτέρω ανάπτυξης και αξιοποίησης. Αποτελεί εξέλιξη του Telosb και είναι το πιο πρόσφατο προϊόν σε μια σειρά από motes που αναπτύχθηκαν από το Πανεπιστήμιο της California, Berkeley με σκοπό τη χρήση τους σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.



Εικόνα 16: Η ασύρματη μονάδα Tmote sky

Πηγή: <http://tdoa.host56.com/tmote.htm>

Τα κυριότερα γνωρίσματα και τεχνικά χαρακτηριστικά του Tmote Sky φαίνονται περιληπτικά παρακάτω:

2.3.1 Βασικά γνωρίσματα

Τα βασικά γνωρίσματα της πλατφόρμας μπορούν να συνοψιστούν ως εξής. Ο ασύρματος πομποδέκτης επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 250kbps στα 2.4GHz με χρήση του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4 Chipcon.

Ο μικροελεγκτής είναι ο 8MHz Texas Instruments MSP430 (με 10k RAM, 48k Flash). Υπάρχει ο ολοκληρωμένος ADC, DAC, Supply Voltage Supervisor και ελεγκτής DMA, καθώς και onboard κεραία με εμβέλεια 50m σε εσωτερικούς χώρους / 125m σε εξωτερικούς.

Ο κόμβος έχει ενσωματωμένους αισθητήρες υγρασίας, θερμοκρασίας και φωτός, και χαρακτηρίζεται από χαμηλή κατανάλωση ρεύματος και γρήγορη αφύπνιση (<6μs).

Έχει επίσης δυνατότητα κωδικοποίησης και πιστοποίησης αυθεντικότητας στο στρώμα ζεύξης υλικού, αλλά δίνει και στον χρήστη τη δυνατότητα προγραμματισμού και συλλογής δεδομένων μέσω USB.

Υποστηρίζει επέκταση 16pin και υπάρχει προαιρετικός συνδετήρας SMA για εξωτερική κεραία, και βασίζεται στο λειτουργικό σύστημα TinyOS

2.3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του κόμβου - αισθητήρα

Η υλοποίηση και ανάπτυξη του tmote στηρίχθηκε σε τρεις βασικούς στόχους: την ακόμα χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές πλατφορμών, την ευκολία χρήσης και την ευρωστία περαιτέρω ανάπτυξης και πειραματισμού. Ο σχεδιασμός της μονάδας Tmote Sky στηρίζεται στην ακόλουθη βασική αρχή που αναφέραμε και προηγουμένως: Η μονάδα-κόμβος βρίσκεται σε αδράνεια στο σύνολο του χρόνου, αφυπνίζεται άμεσα με την ύπαρξη ενός συμβάντος, επεξεργάζεται το συμβάν και επιστρέφει σε αδράνεια. Η ολοκληρωμένη σχεδίαση του προσφέρει όμως κάτι παραπάνω από απλά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία του. Επιτρέπει στους σχεδιαστές να εκμεταλλευτούν την

αυξημένη λειτουργικότητά του και να αναπτύξουν πιο εύρωστα συστήματα. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται πιο αναλυτικά τα κύρια χαρακτηριστικά της μονάδας *tmote* καθώς και τα πλεονεκτήματα της σε σχέση με άλλες πλατφόρμες, πλεονεκτήματα που μας οδήγησαν τελικά και στην επιλογή του προϊόντος αυτού για την εφαρμογή μας.

2.3.3 Η εξέλιξη των μονάδων

Από την στιγμή που κυκλοφόρησε η μονάδα *Mica2* το 2002, εμφανίστηκε ένα πλήθος νέων μικροελεγκτών που προσέφεραν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, περισσότερα ενσωματωμένα περιφερειακά και ποικίλα μεγέθη σε μνήμες RAM και flash.

Η μονάδα *tmote* χρησιμοποιεί τον μικροελεγκτή MSP430, ο οποίος, όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, έχει τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε καταστάσεις αδράνειας και ενεργής λειτουργίας. Ο μικροελεγκτής αυτός λειτουργεί με ελάχιστη τάση 1.8 V. Η απαίτηση χαμηλών τιμών τάσης είναι σημαντική για την εξαγωγή όλης της ενέργειας από μια πηγή τάσης. Για παράδειγμα, οι μπαταρίες τύπου AA έχουν τάση αποκοπής στα 0.9V. Αν χρησιμοποιηθούν 2 μπαταρίες σε σειρά, η τάση αποκοπής του συστήματος είναι 1.8V, ακριβώς η ίδια με την ελάχιστη τάση που απαιτεί ο MSP430. Αντίθετα, ο μικροελεγκτής ATmega128 MCU (*Mica family*) λειτουργεί με ελάχιστη τάση 2.7V, αφήνοντας αχρησιμοποίητο σχεδόν το 50% των μπαταριών τύπου AA. Ο MSP430 έχει επιπλέον τον ταχύτερο χρόνο αφύπνισης από όλους τους μικροελεγκτές, μεταβαίνοντας από την κατάσταση αναμονής (*standby* 1μΑ) στην κατάσταση λειτουργίας το πολύ σε 6 μs. Επίσης, διαθέτει έναν ελεγκτή DMA (*Direct Memory Access controller*) προσφέροντας τη δυνατότητα μείωσης του φορτίου στον πυρήνα του μικροελεγκτή και της κατανάλωση ενέργειας, καθώς και αύξησης της απόδοσης.

Η τάση που επικρατεί είναι να παραμένουν περίπου σταθερά τα μεγέθη των

μνημών RAM και flash (όπως εμφανίζονται στον Πίνακα) και να προστίθενται επιπλέον στοιχεία επιτάχυνσης (accelerator modules) υλικού. Ο MSP430 παρέχει τη μεγαλύτερη ενσωματωμένη ενδιάμεση μνήμη RAM (RAM buffer 10 KB), χρήσιμη σε περιπτώσεις on-chip επεξεργασίας σήματος. Η δυνατότητα αποθήκευσης σε μεγαλύτερες μνήμες RAM παρόλο που μπορεί να φανεί χρήσιμη σε πιο απαιτητικές εφαρμογές δεν αποτελεί μέχρι σήμερα, γενικά, περιοριστικό παράγοντα στην εξέλιξη των εφαρμογών δικτύων ασύρματων αισθητήρων (WSN applications).

2.3.4 Ασύρματος πομποδέκτης

Υπάρχουν δύο τύποι ραδιοπομπών χαμηλής ισχύος, χαμηλού ρυθμού δεδομένων: οι στενής ζώνης (narrowband) και οι ευρυζωνικοί (wideband). Αρκετοί narrowband πομποδέκτες παρέχουν πολύ γρήγορους χρόνους εκκίνησης (startup times) καθώς συγχρονίζονται από τον μικροελεγκτή (MCU) αλλά, έχουν απλά σχήματα διαμόρφωσης, δεν έχουν εξάπλωση κώδικα και είναι ευάλωτοι στο θόρυβο. Οι wideband πομποδέκτες έχουν την ανάγκη ελέγχου από υψηλής ταχύτητας ταλαντωτές. Τα βελτιωμένα σχήματα διαμόρφωσης που εμφανίζονται σε αυτούς τους πομποδέκτες, όπως είναι οι διαμορφώσεις DSSS και O-QPSK, παρέχουν στιβαρότητα στο σήμα απέναντι στο θόρυβο και την παρεμβολή. Οι narrowband ραδιοπομποδέκτες λειτουργούν συνήθως σε χαμηλότερες συχνότητες και με χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων, σε αντίθεση με τους wideband που λειτουργούν συνήθως στη συχνότητα των 2.4GHz και προσφέρουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Η επιλογή του κατάλληλου πομποδέκτη στηρίζεται σε ορισμένα κριτήρια που ο σχεδιαστής ενός συστήματος πρέπει να λάβει υπόψη του, όπως είναι η επίδραση του θορύβου, η ευελιξία που διατίθεται στην τελική εφαρμογή, η ευκολία επικοινωνίας με άλλες συσκευές, η κατανάλωση ενέργειας και το διαθέσιμο εύρος ζώνης δεδομένων.

Η μονάδα tmote χρησιμοποιεί το πρότυπο IEEE 802.15.4 και υποστηρίζει το πρωτόκολλο ZigBee. Χρησιμοποιώντας έναν τυποποιημένο πομποδέκτη, το tmote μπορεί να επικοινωνήσει με οποιοδήποτε αριθμό

συσκευών που μοιράζονται το ίδιο φυσικό στρώμα, συμπεριλαμβάνοντας και συσκευές άλλων κατασκευαστών. Το Tmote Sky χρησιμοποιεί τον πομποδέκτη Chipcon CC2420 στα 2.4 GHz, έναν ευρυζωνικό πομποδέκτη με διαμόρφωση O-QPSK με DSSS στα 250Kbps. Ο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων επιτρέπει μικρότερους περιόδους λειτουργίας μειώνοντας επιπλέον την κατανάλωση ενέργειας. Ο CC2420 είναι ένας πομποδέκτης με αυξημένη ευαισθησία και χαμηλή ισχύ λειτουργίας, ο οποίος παρέχει αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία. Η λειτουργία του ελέγχεται μέσω του TI MSP430 ενώ, και η ισχύς εξόδου μπορεί να προγραμματιστεί σύμφωνα με τις ανάγκες μας.

Ο CC2420 παρέχει επίσης ένα σύνολο από επιταχυντές υλικού προς βελτίωση της απόδοσης. Αυτοί περιλαμβάνουν κρυπτογράφηση και επαλήθευση, υποστήριξη χειρισμού πακέτων, αυτόματες γνωστοποιήσεις (auto acknowledgments) και αποκρυπτογράφηση διευθύνσεων (address decoding). Απ' τη στιγμή όμως που οι επιταχυντές υλικού είναι ενσωματωμένοι στον πομποδέκτη αντί στον μικροελεγκτή, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για λειτουργίες γενικού σκοπού. Για παράδειγμα, ένα σύνολο δεδομένων μπορεί να είναι κρυπτογραφημένο και αποθηκευμένο σε μια μνήμη flash αλλά, από τη στιγμή που δε στέλνεται κάπου ασύρματα μέσω του πομπού, η μονάδα κρυπτογράφησης του υλικού του πομπού δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

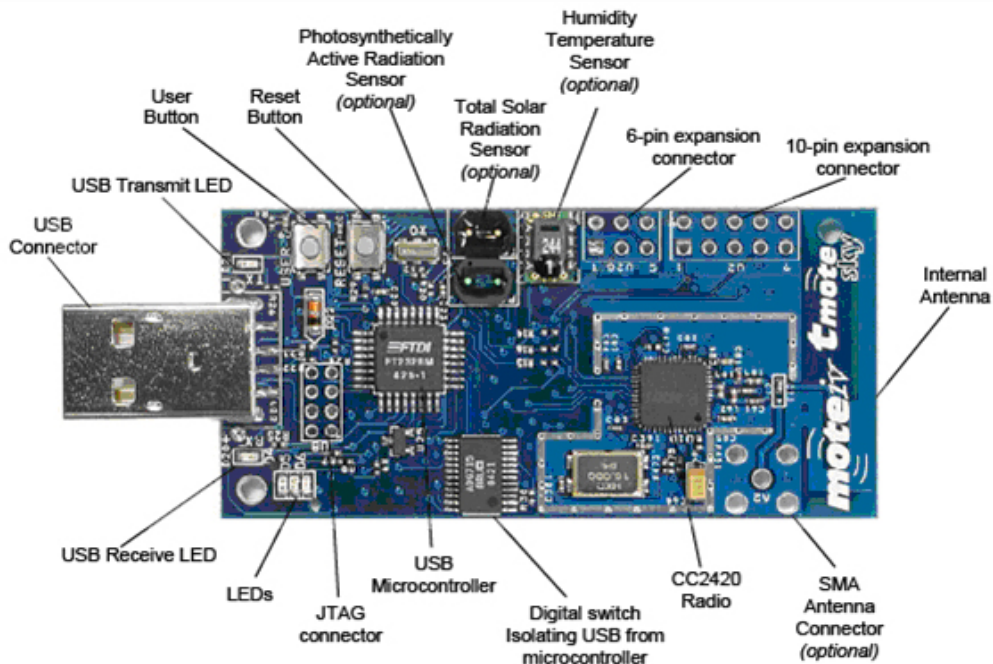
Οι τυπικές συνθήκες λειτουργίας του ασύρματου πομποδέκτη φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

	MIN	NOM	MAX	Μονάδα
Τάση λειτουργίας κατά την ασύρματη εκπομπή (Vreg on)	2.1		3.6	V
Θερμοκρασία λειτουργίας	-40		85	°C
Εύρος συχνοτήτων RF	2400		2483.5	MHz
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	250		250	kbps
Ονομαστική ισχύς εξόδου	-3	0		dBm
Προγραμματιζόμενο εύρος ισχύς εξόδου		40		dBm
Ευαισθησία δέκτη	-90	-94		dBm
Κατανάλωση ρεύματος: ασύρματη μετάδοση σε 0 dBm		17.4		mA
Κατανάλωση ρεύματος: ασύρματη Λήψη		19.7		mA
Κατανάλωση ρεύματος: Radio on, ταλαντωτής on		365		μΑ
Κατανάλωση ρεύματος: κατάσταση αδράνειας, ταλαντωτής off		20		μΑ
Κατανάλωση ρεύματος: κατάσταση μη λειτουργίας, Vreg off			1	μΑ
Ρεύμα ρυθμιστή τάσης	13	20	29	μΑ
Χρόνος εκκίνησης ασύρματου ταλαντωτή		580	860	μs

Πίνακας 3: Τυπικές συνθήκες λειτουργίας ασύρματου πομποδέκτη Chipcon CC2420

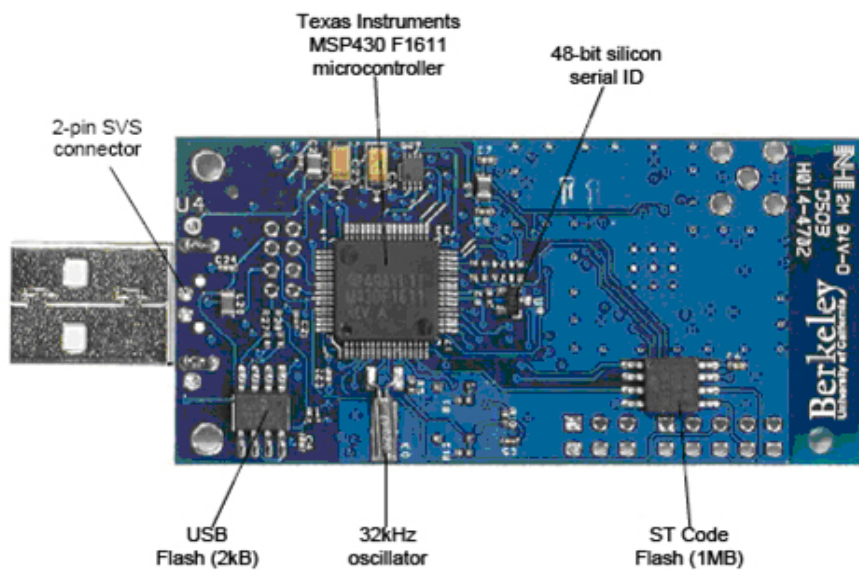
2.3.5 Ο συνολικός κόμβος

Το tmote-sky είναι μια μονάδα που συνδυάζει ενσωματωμένους αισθητήρες, δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας, κεραία, μικροελεγκτή και προγραμματιστικές δυνατότητες. Η ολοκληρωμένη σχεδίασή του παρέχει μια εύχρηστη μονάδα-κόμβο με αυξημένη στιβαρότητα. Τα τμήματα απ' τα οποία αποτελείται η μονάδα αυτή φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 17: εμπρός όψη του Tmote sky.

Πηγή: <http://tdoa.host56.com/tmote.htm>



Εικόνα 18: Οπίσθια όψη του Tmote sky.

Πηγή: <http://tdoa.host56.com/tmote.htm>

Το Tmote Sky χρησιμοποιεί μια ενσωματωμένη κεραία στα 2.4GHz , η οποία είναι μια μικροταινία σε σχήμα ανεστραμμένου F (Planar Inverted Folded Antenna – PIFA) και η οποία βρίσκεται τυπωμένη στην άκρη της πλακέτας, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα (εμπρός όψη). Η κεραία

αυτή επιτυγχάνει εμβέλεια 50 μέτρων σε εσωτερικούς χώρους και μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 125 μέτρα σε ανοιχτούς. Μια προαιρετική SMA coax σύνδεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί της εσωτερικής κεραίας. Η ενσωμάτωση της κεραίας χαμηλώνει το συνολικό κόστος του mote αφού δεν απαιτείται άλλο ακριβό σύστημα εξωτερική κεραίας. Ο προγραμματισμός της μονάδας γίνεται μέσω σύνδεσης με τη θύρα USB ενός υπολογιστή. Για αυτό το λόγο ενσωματώνει πάνω του το κατάλληλο βύσμα USB που το απαλλάσσει από την ανάγκη χρήσης εξωτερικών καρτών διεπαφών.

2.3.6 Κατανάλωση ενέργειας

Η κατανάλωση ενέργειας ενός αισθητήρα δεν αφορά μόνο τον μικροελεγκτή και/ή τον πομποδέκτη, αλλά επίσης και τα βοηθητικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται. Στον Πίνακα παρουσιάζεται η κατανάλωση ρεύματος σε διάφορες λειτουργίες της μονάδας *mote* σε σύγκριση με τις πλατφόρμες Mica2 και MicaZ.

Operation	Telos	Mica2	MicaZ
Minimum Voltage	1.8V	2.7V	2.7V
Mote Standby (RTC on)	5.1 μ A	19.0 μ A	27.0 μ A
MCU Idle (DCO on)	54.5 μ A	3.2 mA	3.2 mA
MCU Active	1.8 mA	8.0 mA	8.0 mA
MCU + Radio RX	21.8 mA	15.1 mA	23.3 mA
MCU + Radio TX (0dBm)	19.5 mA	25.4 mA	21.0 mA
MCU + Flash Read	4.1 mA	9.4 mA	9.4 mA
MCU + Flash Write	15.1 mA	21.6 mA	21.6 mA
MCU Wakeup	6 μ s	180 μ s	180 μ s
Radio Wakeup	580 μ s	1800 μ s	860 μ s

Πίνακας 4: Μετρημένη κατανάλωση ρεύματος του Telos σε σύγκριση με τα Mica2 και MicaZ motes.

Το tmote εμφανίζει χαμηλότερη κατανάλωση μνήμης flash και στον μικροελεγκτή, συγκριτικά με το Mica2 (Atmel με CC1000 radio) και το MicaZ (Atmel με CC2420 radio). Λόγω της ολοκληρωμένης σχεδίασης του, ένα επιπλέον ρεύμα της τάξης των 3mA καταναλώνεται, σε κατάσταση αδράνειας, σε διακόπτες και ενδιάμεσες μνήμες για την προστασία από ροή του ρεύματος προς αποσυνδεδεμένα στοιχεία, και κυρίως το κύκλωμα της USB. Παρά το μικρό trade off, η συνολική κατανάλωση ενέργειας σε έναν κύκλο λειτουργίας (αφύπνιση, δειγματοληψία, μετάδοση και αδράνεια) είναι χαμηλότερη εκείνης των υπόλοιπων πλατφορμών. Η κατανάλωση ενέργειας ισούται με το συνολικό χρόνο ενεργής λειτουργίας της μονάδας, πολλαπλασιασμένο με το ρεύμα που καταναλώνεται σε αυτό το χρόνο. Αφού το Tmote Sky έχει χαμηλότερη κατανάλωση ρεύματος, χαμηλότερο χρόνο αφύπνισης και χαμηλότερη τάση λειτουργίας, μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από προηγούμενους σχεδιασμούς. Με 1% duty cycle, το Telos μπορεί να διαρκέσει για σχεδόν 3 χρόνια. Συγκριτικά, η διάρκεια ζωής του Mica2 mote είναι 1.5 χρόνια και του MicaZ mote είναι 1 χρόνος. Η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας δε σημαίνει ότι το Tmote Sky εμφανίζει μικρότερη λειτουργικότητα, καθώς όλο και ισχυρότερα στοιχεία μικροεπεξεργαστών ενσωματώνονται στους μικροελεγκτές.

Η μονάδα Tmote Sky ενσωματώνει επίσης έναν ελεγκτή DMA ο οποίος λειτουργεί ενώ ο πυρήνας της μονάδας του μικροελεγκτή (MCU) βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας. Ο ελεγκτής DMA επιτρέπει σε εφαρμογές να εκτελούν διεργασίες όπως η δειγματοληψία του ADC, η έξοδος ενός σήματος στον ψηφιακό-αναλογικό μετατροπέα DAC καθώς και η ασύρματη μετάδοση δεδομένων χωρίς τη μεσολάβηση της MCU. Ο ελεγκτής DMA χρησιμοποιείται παραδοσιακά για την αύξηση της επίδοσης, αλλά στην περίπτωση των ενσωματωμένων συστημάτων χαμηλής ισχύος, αυτό που κάνει στην πραγματικότητα είναι να χαμηλώνει το duty cycle, επιτρέποντας στον πυρήνα του μικροελεγκτή να παραμένει σε κατάσταση αδράνειας για περισσότερο χρόνο και να εξυπηρετεί λιγότερες διακοπές υλικού (hardware interrupts). Η βελτίωση των επιδόσεων λόγω του DMA μας επιτρέπουν να φτάσουμε σε ρυθμό δειγματοληψίας μέχρι και 200ksamples/sec σε σύγκριση με τη μέγιστη

δυνατότητα των 10ksamples/sec σε μικροελεγκτές χωρίς DMA.

2.3.7 Αισθητήρες του κόμβου

Πάνω στην πλακέτα του sky mote βρίσκονται ενσωματωμένοι αισθητήρες υγρασίας/θερμοκρασίας και φωτός, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλήθος εφαρμογών. Ο αισθητήρας υγρασίας/θερμοκρασίας, κατασκευασμένος από την εταιρεία Sensirion AG, παράγεται χρησιμοποιώντας μια CMOS επεξεργασία και συνδυάζεται με έναν 14bit αναλογικό/ψηφιακό μετατροπέα (A/D converter). Ο αισθητήρας φωτός χρησιμοποιεί φωτοδιόδους, στη συγκεκριμένη περίπτωση κατασκευασμένους από την Hamamatsu Corporation, οι οποίοι 'αντιδρούν' στην ακτινοβολία φωτός. Τέλος, ο μικροελεγκτής MPS430 διαθέτει και εσωτερικούς αισθητήρες θερμοκρασίας και τάσης οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσω της διεπαφής ADC του μικροελεγκτή. Η θύρα τάσης στον 12-bit ADC καταγράφει την έξοδο από έναν διαχωριστή τάσης.

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας είναι τοποθετημένοι στο εξωτερικό του αισθητήρα Sensirion.

2.3.7.1 Θερμοκρασία

Για τη θερμοκρασία, το Oscilloscope επιστρέφει μία 14-bit τιμή που μετατρέπεται σε βαθμούς Κελσίου από τον ακόλουθο τύπο:

$$T = -39.60 + 0.01 * SOT$$

όπου SOT είναι η μη επεξεργασμένη τιμή της θερμοκρασίας.

2.3.7.2 Υγρασία

Η υγρασία είναι μία 14-bit τιμή και υπολογίζεται από τους παρακάτω τύπους :

$$Humidity_{linear} = -4 + 0.405 * SOrh + (-2.8 * 10^{-6}) * (SOrh^2)$$

όπου SOrh η μη επεξεργασμένη τιμή του αισθητήρα υγρασίας ο οποίος εξαρτάται από τη θερμοκρασία .

Χρησιμοποιώντας το παραπάνω αποτέλεσμα και την τιμή της θερμοκρασίας από την προηγούμενη ενότητα, με βάση τον ακόλουθο τύπο παίρνουμε την πραγματική τιμή της υγρασίας:

$$Humidity_{true} = (Tc - 25) * (0.01 + 0.00008 * SOrh) + humidity$$

όπου Tc η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου έτσι όπως υπολογίστηκε στο προηγούμενο.

2.3.7.3 Εσωτερική Τάση

Ο αισθητήρας εσωτερικής τάσης χρησιμοποιεί το 12-bit ADC του μικροελεγκτή του Mote. Στη θύρα τάσης του ADC απεικονίζεται το αποτέλεσμα από ένα διαιρέτη τάσης. Άρα για τη μετατροπή σε φυσικές μονάδες χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο τύπο:

$$V_{cc} = \frac{RawValue}{4096} * V_{ref} * \frac{2R}{R}$$

όπου Vref = 1.5V η τάση των μπαταριών που χρησιμοποιεί το mote, RawValue η τιμή τάσης του ADC και ο αριθμός 4096 = 2¹² γιατί έχουμε 12-bit ADC.76

2.3.7.4 Εσωτερική Θερμοκρασία

Παρόμοια με την εσωτερική τάση, ο αισθητήρας εσωτερικής θερμοκρασίας είναι μη-βαθμονομημένος και δειγματοληπτείται με τη χρήση του 12-bit ADC που βρίσκεται στον 16-bit microcontroller. Αν και μη βαθμονομημένος ο ακόλουθος τύπος λειτουργεί σωστά για αρκετές εφαρμογές, ωστόσο όμως κάποιες φορές το σφάλμα μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο.

$$T = \frac{V_{temp} - 0.986}{0.0035}$$

Όπου V_{temp} η τιμή της τάσης που υπολογίζεται με βάση την προηγούμενη ενότητα, διαιρεμένη με το 2. Αυτό γιατί υπολογίζουμε την εσωτερική θερμοκρασία συναρτήσει της τιμής τάσης που εμφανίζεται στη γραμμή τάσης του ADC (το αποτέλεσμα που προέρχεται από το διαιρέτη τάσης που εξηγήσαμε προηγουμένως).

2.3.7.5 Ολική Ηλιακή Ακτινοβολία (TSR)

Οι TSR και PAR αισθητήρες μετρώνται με τον 12-bit ADC με $V_{ref}=1.5V$. Οι φωτοδιόδοι δημιουργούν ρεύμα κατά μήκος μιας αντίστασης 100KOhm.

Το ρεύμα της φωτοδιόδου του αισθητήρα TSR σε lux προκύπτει από τον τύπο

$$S1087 \text{ lx} = 0.625 * 1e6 * I * 1000$$

Όπου

$$I = \frac{V_{sensor}}{100,000}$$

(από $V_{sensor}=I \cdot R$, με $I=100K\Omega$)

με

$$V_{sensor} = \frac{RawValue}{4096} * V_{ref}$$

2.3.7.6 Ενεργή Φωτοσυνθετικά Ακτινοβολία (PAR)

Το ρεύμα της φωτοδιόδου του PAR προκύπτει από τον τύπο:

$$S1087-01 \text{ lx} = 0.769 * 1e5 * I * 1000$$

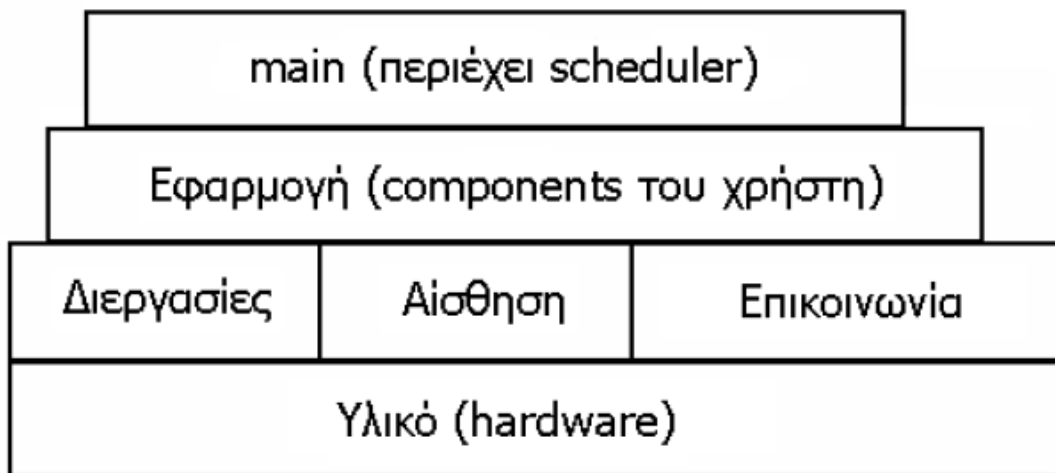
με I όμοια με την προηγούμενη περίπτωση.

3 Το λειτουργικό σύστημα TinyOS

3.1 Εισαγωγή

Το TinyOS αναπτύχθηκε και εξελίχθηκε από το πανεπιστήμιο του Berkley και είναι λογισμικό ανοιχτού κώδικα. Πρόκειται για ένα λειτουργικό σύστημα μικρό σε μέγεθος και οικονομικό ενεργειακά στη διαχείριση των αισθητήρων. Παρέχει ένα σύνολο από δομικές μονάδες λογισμικού από τις οποίες ο προγραμματιστής μπορεί να διαλέξει τα κατάλληλα συστατικά (components). Το μέγεθος τέτοιων αρχείων είναι τις τάξης των 200 bytes έτσι το μέγεθος του συνολικού προγράμματος παραμένει το ελάχιστο δυνατό. Το λειτουργικό σύστημα αυτό διαχειρίζεται τόσο το υλικό όσο και το ασύρματο δίκτυο εκτελώντας τις μετρήσεις των αισθητήρων, παίρνοντας αποφάσεις δρομολόγησης και ελέγχοντας την κατανάλωση ενέργειας.

Λόγω των περιορισμών που επέβαλλε η φύση των αισθητήρων, μια νέα γλώσσα προγραμματισμού αναπτύχθηκε, η nesC, που υλοποιεί τις δομικές σχεδιαστικές ανάγκες και την επαναχρησιμοποίηση κώδικα του TinyOS για μικροσκοπικούς αισθητήρες. Για την υλοποίηση της επαναχρησιμοποίησης το TinyOS εφαρμόζει μια αρχιτεκτονική κατανομής σε επιμέρους συστατικά (component – based). Επιπρόσθετα για την βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας χρησιμοποιεί ένα μοντέλο εκτέλεσης βασισμένο σε γεγονότα (event – based) όπου τα γεγονότα οδηγούν τα προγράμματα και οι σχετικοί πόροι αποδεσμεύονται με το πέρας της χρήσης τους. Επίσης, το TinyOS έχει βελτιστοποιηθεί ως προς την χρήση της μνήμης και προσφέρει υψηλή αποδοτικότητα ως προς την κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, παρέχει διεπαφές (interfaces) μεταξύ των επιμέρους τμημάτων που το συνθέτουν και που ανήκουν σε γειτονικά στρώματα της αρχιτεκτονικής του. Ένα τέτοιο διάγραμμα στρωμάτων αυτής της αρχιτεκτονικής φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 19: Δομικό διάγραμμα στρωμάτων της αρχιτεκτονικής του TinyOS

Πηγή: <http://www.tinyos.net>

Η προσαρμογή του TinyOS σε διάφορα είδη πλατφόρμων είναι εύκολη εξαιτίας της εύχρηστης και αφαιρούμενης διαστρωμάτωσης σε επίπεδο υλικού στον πυρήνα. Η διαστρωμάτωση αυτή επίσης διευκολύνει πολύ την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων .

Το TinyOS ακόμα προσφέρει μια σειρά από εφαρμογές και εργαλεία ανάπτυξης όπως το Tossim (προσομοιωτής δικτύων του TinyOS) ,το deluge και το TinyDB που βοηθούν στην ανάπτυξη και έρευνα των WSN. Λόγω της αποδοτικής σχεδίασης, της μεγάλης κοινότητας υποστήριξης και του ανοικτού κώδικα το TinyOS έγινε το πλέον διαδεδομένο λειτουργικό σύστημα για τα WSN.

3.2 Η γλώσσα NesC

3.2.1 Εισαγωγή

Τα πρώτα ασύρματα ενσωματωμένα συστήματα αισθητήρων έτρεχαν πάνω σε προσωπικούς υπολογιστές και χρησιμοποιούσαν κυρίως προγράμματα Linux. Όταν η ανάπτυξη αυτών των δικτύων πέρασε από τους μικροεπεξεργαστές (microprocessors) στους μικροελεγκτές (microcontrollers), το Linux είχε πάψει να αποτελεί την κατάλληλη επιλογή. Οι εφαρμογές των συστημάτων της εποχής εκείνης αναπτύσσονταν κυρίως σε τυπική γλώσσα C ή κατευθείαν σε γλώσσα assembly. Ο προγραμματισμός όμως σε αυτή τη γλώσσα είναι δύσκολο να αναλυθεί και επίσης μπορεί εύκολα να καταλήξει εκτός ελέγχου όταν η πολυπλοκότητα της εφαρμογής αυξηθεί. Σε πολυκλιμακωτά συστήματα το πρόβλημα μπορεί να επιληφθεί με αντικειμενοστραφή προγραμματισμό (object-oriented programming), ο οποίος καθιστά ευκολότερο το διαχωρισμό πολύπλοκων προγραμμάτων σε ανεξάρτητα, ευκολοσύνθετα συστατικά. Αλλά ο προγραμματισμός με προσανατολισμό στο αντικείμενο απαιτεί δυναμική παραχώρηση μνήμης και τείνει να απαιτεί περισσότερους προγραμματιστικούς πόρους, κάτι το οποίο τον κρίνει ακατάλληλο για ενσωματωμένα συστήματα (embedded systems). Η γλώσσα NesC, η οποία αναπτύχθηκε από ερευνητές του Πανεπιστημίου UC Berkeley, αντιπροσωπεύει ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο για τους σχεδιαστές εφαρμογών. Είναι κατάλληλα σχεδιασμένη για ενσωματωμένα συστήματα δικτύων και υποστηρίζει ένα προγραμματιστικό μοντέλο που ενσωματώνει αντιδραστικότητα με το περιβάλλον, ταυτοχρονισμό και δυνατότητα επικοινωνίας.

Ένα βασικός άξονας επικέντρωσης της NesC είναι η ολιστικός σχεδιασμός συστημάτων. Οι εφαρμογές των μονάδων-αισθητήρων (moten) είναι βαθιά συνδεδεμένες στο υλικό και κάθε μονάδα τρέχει μια εφαρμογή κάθε φορά. Έτσι υπάρχει ένας αριθμός μοναδικών προκλήσεων που η γλώσσα NesC πρέπει να επιληφθεί:

ο Οδήγηση από την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον: Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συστήματα υπολογιστών, τα motes χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων και τον έλεγχο του τοπικού περιβάλλοντος, παρά για γενικής φύσεως υπολογισμούς. Αυτή η ιδιαιτερότητα οδηγεί σε δυο παρατηρήσεις: Η πρώτη είναι ότι τα motes είναι στοιχειωδώς οδηγούμενα από συμβάντα (event driven), αντιδρώντας σε αλλαγές του περιβάλλοντος (άφιξη ενός μηνύματος, ανάκτηση δεδομένων από αισθητήρες) παρά οδηγούμενα από διαδραστική (interactive) ή κατά δεσμίδες (batch) επεξεργασία. Η δεύτερη παρατήρηση είναι ότι η 'άφιξη' ενός συμβάντος ή η επεξεργασία δεδομένων είναι συντρέχουσες δραστηριότητες, απαιτώντας έτσι μια μεθόδευση για διαχείριση του ταυτοχρονισμού αυτού που επιλαμβάνεται ενδεχόμενων σφαλμάτων (bugs) όπως οι συνθήκες συναγωνισμού (race conditions).

ο Περιορισμένοι πόροι: Οι μονάδες αυτές (motes) έχουν πολύ περιορισμένους φυσικούς πόρους, λόγω των ιδιαίτερων αναγκών για μικρό μέγεθος, χαμηλό κόστος και μικρή κατανάλωση ενέργειας. Οι περιορισμοί αυτοί δεν αναμένεται να εκλείψουν, καθώς τα οφέλη από την προσδοκία του νόμου του Moore θα οδηγεί συνεχώς σε μείωση του μεγέθους και του κόστους παρά σε αύξηση δυνατοτήτων-ικανοτήτων στο ίδιο μέγεθος.

ο Αξιοπιστία: Αν και είναι αναμενόμενο οι μονάδες αυτές να παθαίνουν βλάβη λόγω σφαλμάτων υλικού, είναι έντονη η ανάγκη για εφαρμογές οι οποίες μπορεί να τρέχουν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, οι εφαρμογές παρακολούθησης περιβάλλοντος πρέπει να είναι ικανές να συλλέγουν δεδομένα χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση για μήνες κάθε φορά. Ένας σημαντικός στόχος είναι η μείωση των σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης (run-time errors), καθώς δεν υπάρχει ουσιαστικός μηχανισμός ανάκαμψης σφαλμάτων εκτός από την αυτόματη επανεκκίνηση του συστήματος.

ο Μικρές απαιτήσεις για λειτουργίες πραγματικού χρόνου: Παρόλο που υπάρχουν κάποιες εργασίες που είναι χρονικά κρίσιμες, όπως η διαχείριση της ασύρματης επικοινωνίας ή η σταθμοσκόπηση των αισθητήρων, σε γενικές γραμμές δεν υπάρχουν μεγάλες απαιτήσεις για πραγματικού χρόνου

λειτουργίες. Μάλιστα η εμπειρία έχει δείξει ότι οι όποιοι χρονικοί περιορισμοί μπορούν να ικανοποιηθούν έχοντας απόλυτο έλεγχο της εφαρμογής και του λειτουργικού συστήματος και παράλληλα μειώνοντας την χρήση (utilization). Μια από τις λίγες κρίσιμες από πλευράς χρόνου λειτουργίες στα δίκτυα αισθητήρων είναι η ασύρματη επικοινωνία. Δεδομένου όμως της βασικής αναξιοπιστίας της ραδιοζεύξης γενικότερα δε θα χρειαστεί απαραίτητα να ικανοποιήσουμε δύσκολες απαιτήσεις στον τομέα αυτό.

Η γλώσσα NesC είναι προέκταση της C και αναμενόμενα, έχει όμοια σύνταξη, εντούτοις παρέχει τρία σημαντικά στοιχεία που τη διαφοροποιούν σημαντικά:

- ο Η γλώσσα NesC ορίζει ένα μοντέλο συστατικών που υποστηρίζει συστήματα οδηγούμενα από συμβάντα. Το μοντέλο αυτό παρέχει αμφίδρομες διεπαφές (interfaces) προς απλοποίηση της ροής των συμβάντων και επιτρέπει αποδοτική και ελαφριά υλοποίηση χωρίς τη δημιουργία εικονικών συναρτήσεων και δυναμικών στοιχείων.

- ο Παράλληλα ορίζει ένα απλό αλλά συγκεκριμένο μοντέλο ταυτοχρονισμού σε συνδυασμό με εκτεταμένη ανάλυση κατά τη μεταγλώττιση: ο μεταγλωττιστής (compiler) της NesC εντοπίζει τις πλειονότητα των περιπτώσεων ανταγωνισμού δεδομένων (data race) κατά τη διάρκεια της μεταγλώττισης. Αυτός ο συνδυασμός επιτρέπει τη δημιουργία σύγχρονων εφαρμογών που απαιτούν περιορισμένους πόρους.

- ο Τέλος, η γλώσσα NesC παρέχει μια μοναδική ισορροπία μεταξύ της ανάλυσης προγράμματος, για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και τη μείωση του κώδικα, και της δυνατότητας για δημιουργία ολοκληρωμένων εφαρμογών.

Επειδή η γλώσσα NesC έχει αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματική στην περίπτωση ανάπτυξης εφαρμογών για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, χρησιμοποιείται σαν την προγραμματιστική γλώσσα για το λειτουργικό

σύστημα TinyOS, ένα μικρό λειτουργικό σύστημα για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που έχει υιοθετηθεί από ένα μεγάλο πλήθος ερευνητικών ομάδων σε όλο τον κόσμο. Σε εξέλιξη βρίσκονται έρευνες προς ανάπτυξη στο πρότυπο του TinyOS και άλλων γλωσσών προγραμματισμού αλλά μέχρι στιγμής η NesC είναι η μόνη γλώσσα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη προγραμμάτων στο TinyOS.

3.2.2 Συστατικά και διεπαφές(Components and interfaces)

Η nesC είναι μια γλώσσα βασισμένη σε συστατικά (components). Τα συστατικά της nesC χρησιμοποιούν ένα καθαρά τοπικό namespace. Αυτό σημαίνει ότι εκτός από τη δήλωση των λειτουργιών που υλοποιεί, ένα συστατικό πρέπει επίσης να δηλώσει τις λειτουργίες που καλεί από άλλο συστατικό. Τα ονόματα που ένα συστατικό χρησιμοποιεί για να καλέσει αυτές τις λειτουργίες έχουν αυστηρά τοπική εμβέλεια: το όνομα στο οποίο αναφέρεται δεν είναι απαραίτητα το ίδιο με αυτό στο οποίο υλοποιείται η λειτουργία. Όταν ένα συστατικό A δηλώνει ότι καλεί μια λειτουργία (συνάρτηση) B, εισάγει ουσιαστικά το όνομα A.B ως ένα καθολικό namespace. Ένα διαφορετικό συστατικό, C, το οποίο καλεί τη λειτουργία B εισάγει C.B ως ένα καθολικό namespace. Ακόμα κι αν και το A και το C αναφέρονται στη λειτουργία B, μπορεί να αναφέρονται σε απολύτως διαφορετικές υλοποιήσεις.

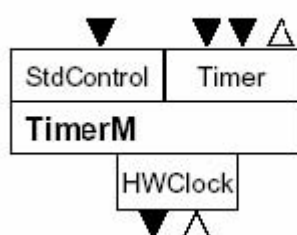
Κάθε συστατικό έχει μια προδιαγραφή, ένα μπλοκ κώδικα που δηλώνει τις λειτουργίες που παρέχει (implements) και τις λειτουργίες που χρησιμοποιεί (calls). Στην πράξη, τα συστατικά πολύ σπάνια δηλώνουν τις μεμονωμένες λειτουργίες στην προδιαγραφή τους. Αντί αυτού, η nesC έχει διεπαφές, οι οποίες είναι συλλογές των σχετικών λειτουργιών. Οι συστατικές προδιαγραφές είναι σχεδόν πάντα σε αναλογία προς τις διεπαφές. Αυτές οι διεπαφές είναι τα μοναδικά σημεία πρόσβασης στο συστατικό και είναι αμφίδρομες. Μια διεπαφή, γενικά, απεικονίζει μια υπηρεσία (όπως η αποστολή ενός μηνύματος) και προσδιορίζεται από ένα τύπο διεπαφής (interface type).

Η σύνδεση των παροχών και των χρηστών από κοινού καλείται καλωδίωση (wiring). γιατί ο κώδικας χωρίζεται στα συστατικά, ιδιαίτερες μονάδες λειτουργίας τα οποία «καλωδιώνονται για να λειτουργήσει μια εφαρμογή.

Ένα συστατικό μπορεί μόνο να παραπέμψει μεταβλητές από το δικό του τοπικό namespace και δε μπορεί να ονομάζει μεταβλητές σε ένα άλλο συστατικό. Εντούτοις, μπορεί να δηλώσει ότι χρησιμοποιεί μια λειτουργία που καθορίζεται από άλλο συστατικό ή ότι παρέχει μια λειτουργία που ένα άλλο συστατικό μπορεί να καλέσει.

Οι διεπαφές στη NesC είναι, όπως είπαμε, αμφίδρομες. Μια διεπαφή δηλώνει ένα σύνολο από συναρτήσεις, οι οποίες καλούνται εντολές (commands), τις οποίες ο πάροχος μιας διεπαφής πρέπει να υλοποιήσει, καθώς και ένα σύνολο συναρτήσεων, ονομαζόμενων συμβάντα (events), τις οποίες ο χρήστης μιας διεπαφής πρέπει να υλοποιήσει. Για να καλέσει κάποιο συστατικό τις εντολές σε ένα interface, πρέπει να υλοποιήσει τα συμβάντα αυτής της διεπαφής. Ένα συστατικό από μόνο του μπορεί να χρησιμοποιεί και να παρέχει περισσότερες από μια διεπαφές καθώς και πολλαπλά στιγμιότυπα της ίδιας διεπαφής. Για παράδειγμα, η διεπαφή Timer ορίζει τις εντολές start και stop και το συμβάν fired.

Στην Εικόνα που ακολουθεί, οι παρεχόμενες διεπαφές είναι αυτές που φαίνονται πάνω από το συστατικό TimerM ενώ, αυτές που χρησιμοποιούνται παριστάνονται κάτω από αυτό. Τα 'βέλη' που δείχνουν προς τα κάτω απεικονίζουν τις εντολές, ενώ αυτά που δείχνουν προς τα πάνω απεικονίζουν τα συμβάντα.



```
module TimerM {
    provides {
        interface StdControl;
        interface Timer;
    }
    uses interface clock as Clk;
} ...
```


Εικόνα 20: γραφική απεικόνιση του συστατικού TimerM

Πηγή: <http://www.tinyos.net>

Παρόλο που η ίδια αλληλεπίδραση μεταξύ του timer και του πελάτη (client) θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μέσω δυο ξεχωριστών διεπαφών (μια για τις εντολές start και stop και μια για το συμβάν fired), η ομαδοποίηση αυτών των εντολών και συμβάντων στην ίδια διεπαφή κάνει τον προσδιορισμό πιο ξεκάθαρο και βοηθάει στην αποφυγή λαθών κατά τη διασύνδεση των συστατικών μεταξύ τους. Οι εκτελούμενες σε δυο φάσεις λειτουργίες μπορούν εύκολα να μοντελοποιηθούν τοποθετώντας τις αιτούμενες εντολές και τα συμβάντα ανταπόκρισης στην ίδια διεπαφή.

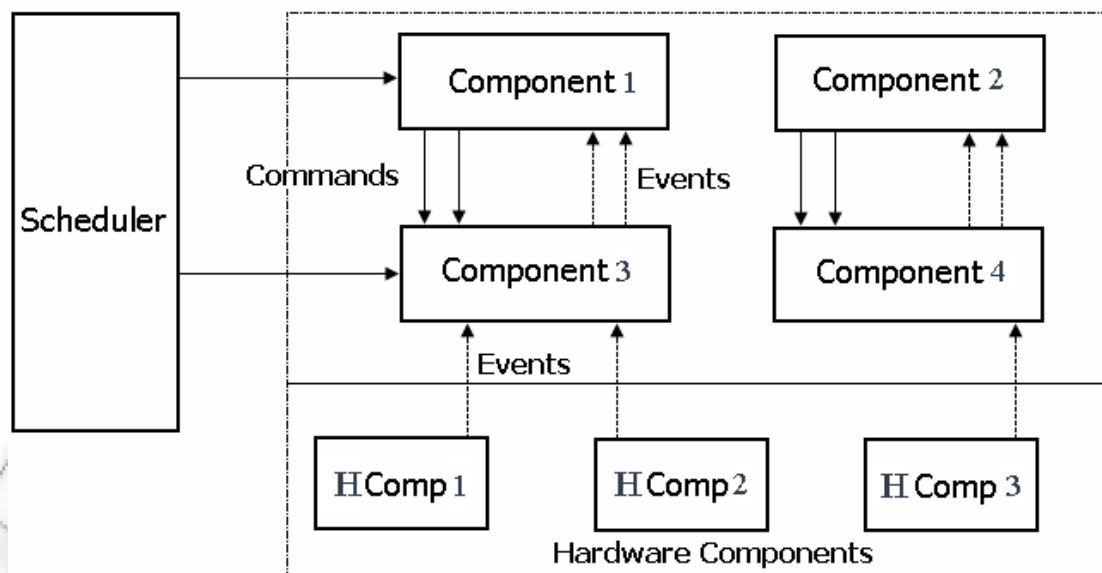
Ο διαχωρισμός αυτός στους ορισμούς των τύπων των διεπαφών από τη χρήση τους στα συστατικά προωθεί τον ορισμό πρότυπων διεπαφών, κάνοντας τα συστατικά (components) πιο ευέλικτα και επαναχρησιμοποιήσιμα.. Αξίζει να σημειώσουμε ότι ένα συστατικό μπορεί να παρέχει και να χρησιμοποιεί τον ίδιο τύπο διεπαφής ή να παρέχει την ίδια διεπαφή περισσότερες από μια φορές. Σε αυτές τις περιπτώσεις το συστατικό πρέπει να δώσει σε κάθε στιγμιότυπο της διεπαφής (interface instance) μια ξεχωριστή ονομασία χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική λέξη 'as', όπως φαίνεται και στο παράδειγμα της Εικόνας που φαίνεται προηγουμένως για το Clk. Τέλος, ένα σημαντικό αλλά λεπτό σημείο είναι ότι οι αμφίδρομες διεπαφές μπορούν να υποστηρίξουν πολύ εύκολα τις διακοπές υλικού (hardware interrupts). Αντιθέτως, οι μονοσήμαντες διεπαφές που βασίζονται σε κλήσεις διαδικασιών υπαγορεύουν τη σταθμοσκόπηση υλικού (hardware polling) ή τη χρήση δυο ξεχωριστών διεπαφών για τις λειτουργίες υλικού και τις αντίστοιχες διακοπές (interrupts).

3.3 Δομή του TinyOS

Προκειμένου να ικανοποιηθούν τα απαραίτητα επίπεδα παραλληλισμού (concurrency levels), το TinyOS χρησιμοποιεί ένα δομικό μοντέλο που βασίζεται σε καταστάσεις αντί σε νήματα. Μετατρέποντας τα

επιμέρους τμήματα διεργασιών (components) σε «μηχανές καταστάσεων», δημιουργείται η δυνατότητα αποδοτικής χρήσης της CPU και της μνήμης. Έτσι, αντί να αφιερώνονται πολλαπλοί σωροί για κάθε τρέχουσα διεργασία, μπορεί να μοιρασθεί ένα ενιαίο πλαίσιο εκτέλεσης μεταξύ των διαφόρων μηχανών καταστάσεων.

Το κάθε συστατικό, τώρα, χρησιμοποιεί γεγονότα και εντολές για να μεταβαίνει γρήγορα από κατάσταση σε κατάσταση. Συνήθως, αυτές οι μεταβάσεις θεωρούνται στιγμιαίες, απαιτώντας πολύ μικρή υπολογιστική ισχύ. Έτσι, κάθε συστατικό προσωρινά δεσμεύει τον επεξεργαστή για όσο χρόνο διαρκούν αυτές οι αλλαγές καταστάσεων. Σε περίπτωση, βέβαια, που απαιτείται περισσότερη υπολογιστική ισχύ χρησιμοποιούνται οι διεργασίες, οι οποίες χρονοπρογραμματίζονται στον scheduler και εκτελούνται χωρίς να διακόπτονται από άλλες διεργασίες (μόνο από τα μεγαλύτερης προτεραιότητας events) μέχρι την ολοκλήρωσή τους. Η διαδικασία δε, που ακολουθείται κατά τον χρονοπρογραμματισμό των διεργασιών είναι FIFO (First In First Out). Η δομή του TinyOS φαίνεται στη επόμενη εικόνα.



Εικόνα 21: Δομή του TinyOS

Πηγή: <http://www.tinyos.net>

Τα συστατικά ικανοποιούν την απαίτηση για μια αρκετά δομημένη αρχιτεκτονική λογισμικού. Κάθε συστατικό, όπως φαίνεται και στην εικόνα, αποτελείται από τέσσερα τμήματα:

- ένα χειριστή εντολών (command handler)
- ένα χειριστή γεγονότων (event handler)
- μια ποσότητα μνήμης (frame)
- ένα σύνολο από δυνατές διεργασίες (tasks)

Η μνήμη χρησιμοποιείται για αποθήκευση της εσωτερικής κατάστασης του συστατικού, ενώ οι διεργασίες και οι χειριστές εντολών και γεγονότων εκτελούνται με βάση το περιεχόμενο αυτού του πλαισίου μνήμης. Επιπλέον δε, το κάθε συστατικό δηλώνει τις εντολές που χρησιμοποιεί και τα γεγονότα που δημιουργεί. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται επίπεδα-στρώματα από συστατικά, με αυτά των υψηλότερων επιπέδων κάθε φορά να χρησιμοποιούν εντολές για κλήση λειτουργιών που παρέχονται από κατώτερων επιπέδων συστατικά και τα τελευταία να δημιουργούν γεγονότα προς τα πρώτα. Έτσι, εισάγεται η έννοια της αμφίδρομης διεπαφής (bi-directional interface) η οποία ορίζει τις εντολές και τα γεγονότα που χρησιμοποιούνται κατά την αλληλεπίδραση των συστατικά μεταξύ τους.

Οι εντολές είναι αιτήματα που υποβάλλονται στα χαμηλότερου επιπέδου συστατικά. Κάθε μια από αυτές επιστρέφει στο συστατικό που την κάλεσε μια πληροφορία γύρω από την κατάστασή της. Την πληροφορία αυτή λαμβάνει ο χειριστής εντολών και την τοποθετεί στο πλαίσιο μνήμης του συστατικού και έπειτα προωθεί μια διεργασία στο σωρό των διεργασιών για εκτέλεση. Η επιβεβαίωση ότι η λειτουργία που συνεπάγεται η συγκεκριμένη

κάθε φορά εντολή ολοκληρώθηκε, γίνεται με τη δημιουργία ενός γεγονότος από το χαμηλότερου επιπέδου συστατικού.

Οι χειριστές γεγονότων αντιδρούν σε γεγονότα που παράγονται από κατώτερων επιπέδων συστατικά ή όταν είναι άμεσα συνδεδεμένοι με το υλικό, σε διακοπές (interrupts). Επίσης, όπως και στις εντολές, το περιεχόμενο του πλαισίου μνήμης τροποποιείται και δημιουργούνται διεργασίες. Έτσι, τα γεγονότα μπορούν να καλέσουν εντολές, να δημιουργήσουν νέα γεγονότα και διεργασίες και να διακόψουν διεργασίες, ενώ δεν μπορούν να δημιουργηθούν από εντολές και να διακοπούν από διεργασίες. Τα κατώτερα επιπέδου γεγονότα, βέβαια, δημιουργούνται από διακοπές του υλικού.

Οι διεργασίες επιτελούν τις βασικές λειτουργίες και τους εντατικούς υπολογισμούς. Εκτελούνται μέχρι την ολοκλήρωσή τους και μπορούν να διακοπούν μόνο από γεγονότα. Επίσης, χρονοπρογραμματίζονται στον αντίστοιχο scheduler με FIFO τρόπο, δηλαδή σειριακά, γι' αυτό και πρέπει να είναι σύντομες. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και βασισμένος σε προτεραιότητα scheduler αντί του FIFO, ώστε να ελαττωθεί η συνολική καθυστέρηση εκτέλεσης των διεργασιών.

4 Σχεδίαση και εγκατάσταση συστήματος

4.1 Εισαγωγή

Το σημαντικότερο μέρος της παρούσας εργασίας στηρίζεται πάνω στην σωστή λειτουργία της multi-hop επικοινωνίας των μονάδων tmote sky μεταξύ τους. Για το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητο η ανάπτυξη της εν λόγω εφαρμογής να γίνει με προσοχή και λεπτομέρεια. Για την αποφυγή λαθών, πάρθηκε η απόφαση της ανάπτυξη της σταδιακά. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται σταδιακά η πολυπλοκότητα της εφαρμογής και κάθε φορά που επιχειρείται να προστεθεί μια επιπλέον λειτουργία, έχει ήδη διαπιστωθεί ότι η προηγούμενη εκδοχή τρέχει σωστά και χωρίς προβλήματα.

Έτσι διασφαλίζεται ότι στην περίπτωση που προκύψει κάποιο πρόβλημα, η αιτία βρίσκεται στις τροποποιήσεις που έχουν γίνει πρόσφατα και όχι στα αρχικά στάδια ανάπτυξη, δηλαδή γίνεται πιο εύκολη η αποσφαλμάτωση του κώδικα της εφαρμογής.

Αρχικά αναζητήσαμε μια «open source εφαρμογή», λόγω του ότι τα αισθητήρια που πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε, η εταιρεία που τα σχεδίασε και παρείχε, έχει κλείσει και το λογισμικό είναι αδύνατο να συμβαδίσει με τα τωρινά δεδομένα.

Ο πρώτος στόχος αναζήτησης του λογισμικού βασίζεται, στο συνδυασμό, τόσο της εφαρμογής Cigwin, όσο και του λειτουργικού TinyOS. Η πιο ικανοποιητική εφαρμογή που βρήκαμε είναι το Instant contiki 2.6, το οποίο πληρούσε τα κριτήρια που είχαμε θέσει. Αλλά το πιο σημαντικό παρείχε κάποια λειτουργικά χαρακτηριστικά που θα μας βοηθούσε στην υλοποίηση της άσκησης μας, όπως το collect-view. Το μοναδικό μειονέκτημα του εν λόγω λειτουργικού, παρότι παρείχε πάρα πολλές βάσεις δεδομένων για πάρα πολλά αισθητήρια, ήταν ότι οι βάσεις δεδομένων για τα αισθητήρια μας (Tmote) ήταν πολύ περιορισμένες. Οπότε κάποιες βάσεις έπρεπε να τις φτιάξουμε από την αρχή με βάση τις υπόλοιπες και σε συνεργασία με διάφορους developers μέσω του φόρουμ

https://sourceforge.net/mailarchive/forum.php?forum_name=contiki-developers , τις εμπλουτίσαμε σε τέτοιο βαθμό ώστε να παρέχονται αρκετές πληροφορίες για όλους τους τύπους αισθητηρίων που θα χρησιμοποιούσαμε.

Επίσης θέλαμε τα δεδομένα που θα λαμβάνουμε από τα αισθητήρια μέσω της εφαρμογής, να τα προωθούσαμε σε ένα web client, ώστε να τα έχουμε διαθέσιμα και απομακρυσμένα.

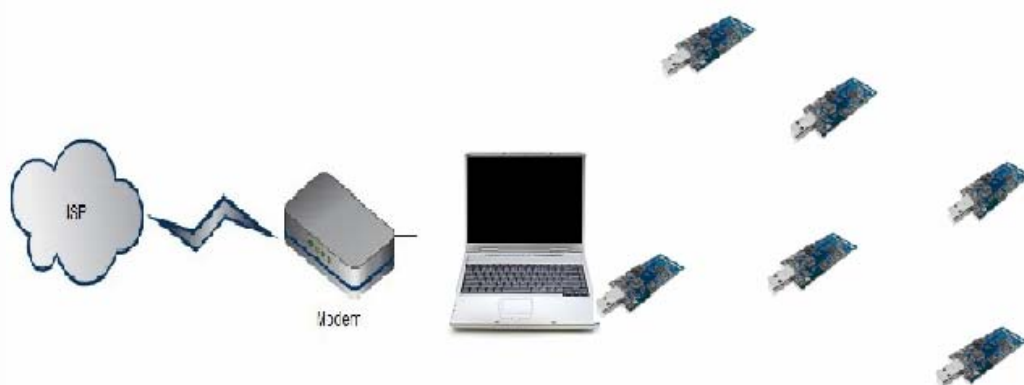
Το τελικό αποτέλεσμα ήταν να έχουμε μια νέα εφαρμογή (στα πρότυπα της αρχικής) σε μορφή java, το sky-boards-collect, το οποίο συνδυάζει όλα τα βασικά μας κριτήρια για την υλοποίηση της άσκησης.

4.2 Αρχιτεκτονική συστήματος

4.2.1 Δομή και τοπολογία

Το σύστημα που υλοποιήθηκε, αποτελείται συνολικά από έξι αισθητήρες, σε συνδυασμό με έναν υπολογιστή στον οποίο τρέχει το αντίστοιχο πρόγραμμα.

Ο ένας αισθητήρας ήταν συνδεδεμένος στον υπολογιστή για την συγκέντρωση των μετρήσεων, και οι άλλοι πέντε ήταν σε τυχαία σημεία τοποθετημένοι, σε εσωτερικό χώρο. Η βασική δομή του συστήματος φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 22: Αρχιτεκτονική συστήματος

4.2.2 Σκοπός των μετρήσεων

Βασικός σκοπός της συγκεκριμένης εφαρμογής που υλοποιήθηκε με βάση την παραπάνω αρχιτεκτονική ήταν η συγκέντρωση και επεξεργασία μιας πληθώρας δεδομένων μέσω των αισθητήρων tmote.

Τα δεδομένα αυτά αφορούν τόσο σε μετρήσεις που λαμβάνουν οι συγκεκριμένοι αισθητήρες που είναι ενσωματωμένοι στους κόμβους (όπως παραδείγματος χάριν θερμοκρασίας και φωτός), όσο και σε δεδομένα σχετικά με την λειτουργία των κόμβων.

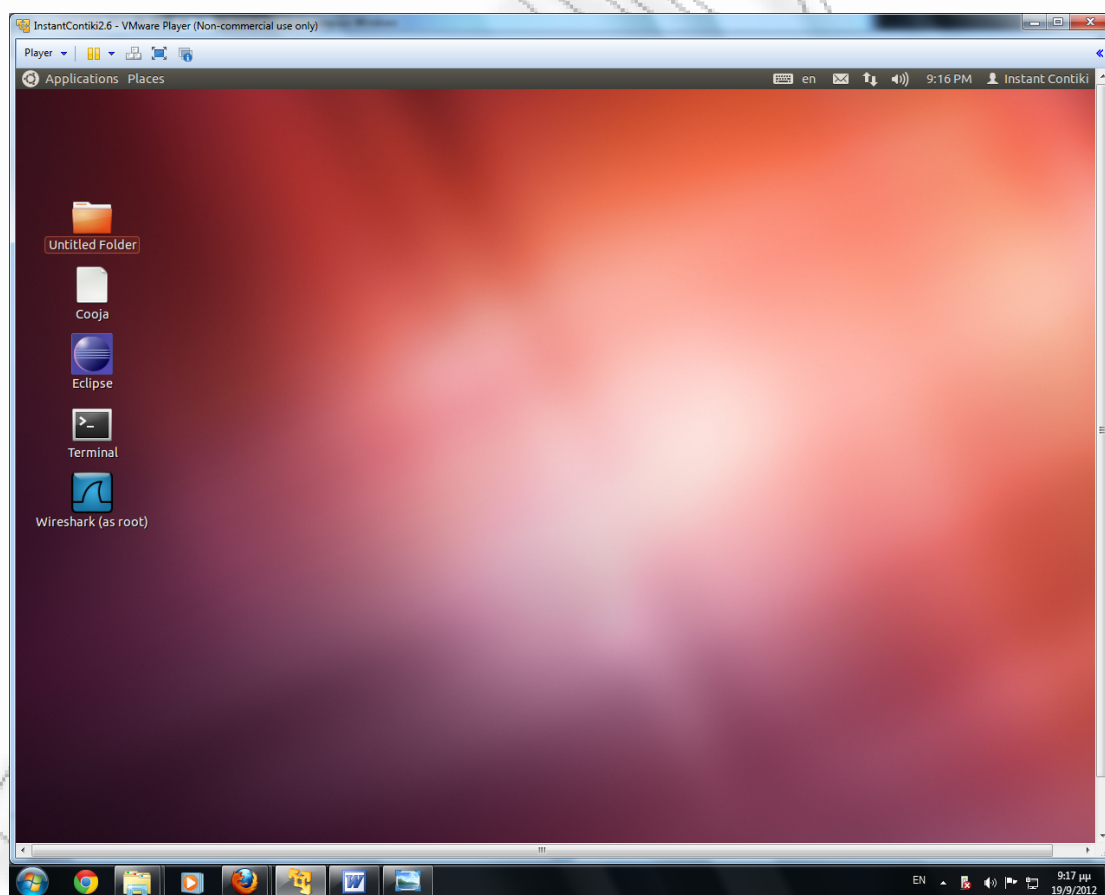
Τα δεδομένα αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν τα επίπεδα ενέργειας που απομένουν στις μπαταρίες του κάθε κόμβου, τον όγκο των δεδομένων που έχουν αποσταλεί ή παραληφθεί σε κάθε χρονική στιγμή, το πλήθος των επιμέρους μεταδόσεων (hops) μέχρι να φτάσει το κάθε πακέτο πληροφορίας στον φορητό υπολογιστή, αλλά και διάφορα άλλα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά σημεία της εγκατάστασης του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε.

4.3 Εγκατάσταση

Η εγκατάσταση του συστήματος βασίστηκε στο Virtual Machine Instant Contiki. Πρόκειται για ένα εικονικό περιβάλλον με προεγκατεστημένη έκδοση λογισμικού linux ubuntu καθώς και συγκεκριμένες εφαρμογές, που είναι χρήσιμες για την συγκέντρωση και απεικόνιση δεδομένων από κόμβους – αισθητήρες διαφόρων εταιριών.

Για την συγκεκριμένη εγκατάσταση, πρώτα αποθηκεύτηκαν τα σχετικά αρχεία και εγκαταστάθηκε η τελευταία έκδοση του VMware player. Εν συνεχεία, έγινε η εγκατάσταση του συγκεκριμένου VM, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 23 Εγκατάσταση συστήματος

Στη συνέχεια, μέσω ενός terminal, εγκαταστάθηκε το εργαλείο Cooja που χρησιμοποιεί η συγκεκριμένη πλατφόρμα:

Το εργαλείο αυτό περιλαμβάνει καταρχήν έναν προσομοιωτή ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας όμως, δεν χρησιμοποιήθηκε προσομοίωση, αλλά λειτουργία πραγματικού δικτύου με χρήση των αισθητήρων tmote moteiv.

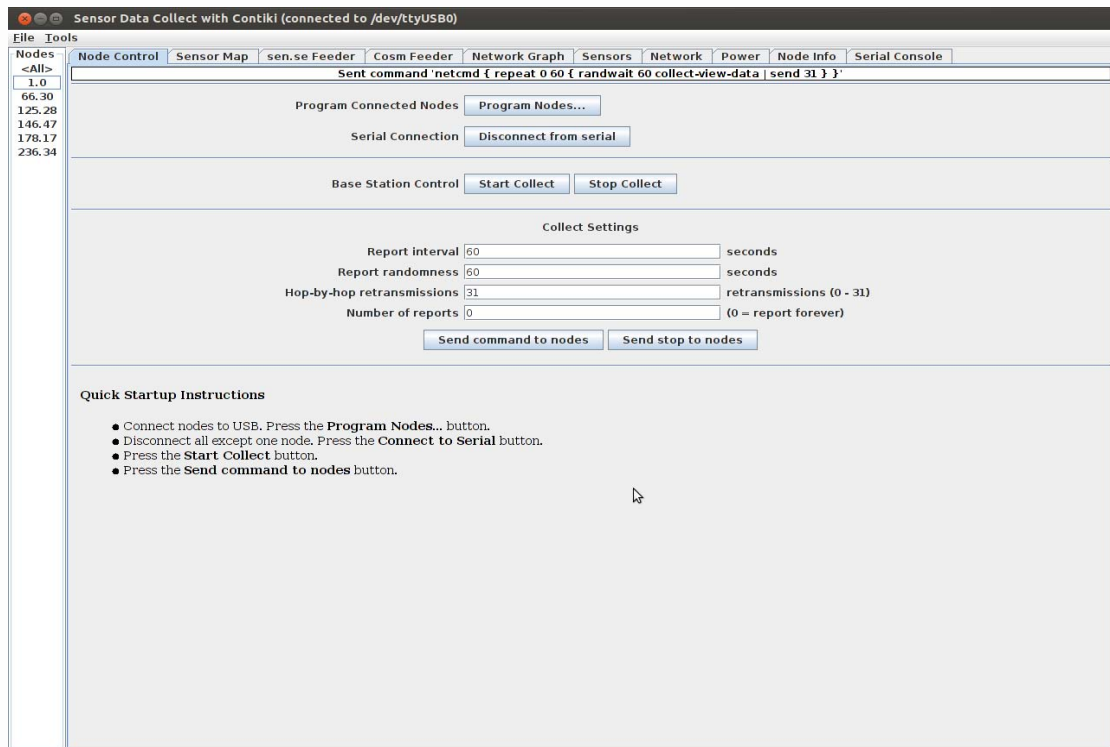
Σε αυτό το πλαίσιο, έγιναν στη συνέχεια compile όλες οι εφαρμογές που αφορούν στην χρήση του συγκεκριμένου υλικού, μέσω μιας εφαρμογής – παραδείγματος και τη χρήση της εντολής make.

Στη συνέχεια, βρέθηκαν και αποθηκεύτηκαν όλες οι εφαρμογές για την συγκέντρωση και απεικόνιση δεδομένων από αισθητήρες sky tmote, μέσω του αρχείου sky-boards-collect.jar.

Σε αυτό το αρχείο βρίσκεται η εφαρμογή CollectView, την οποία εγκαθιστούμε και λειτουργούμε με την παρακάτω εντολή:

```
java -jar sky-boards-collect.jar
```

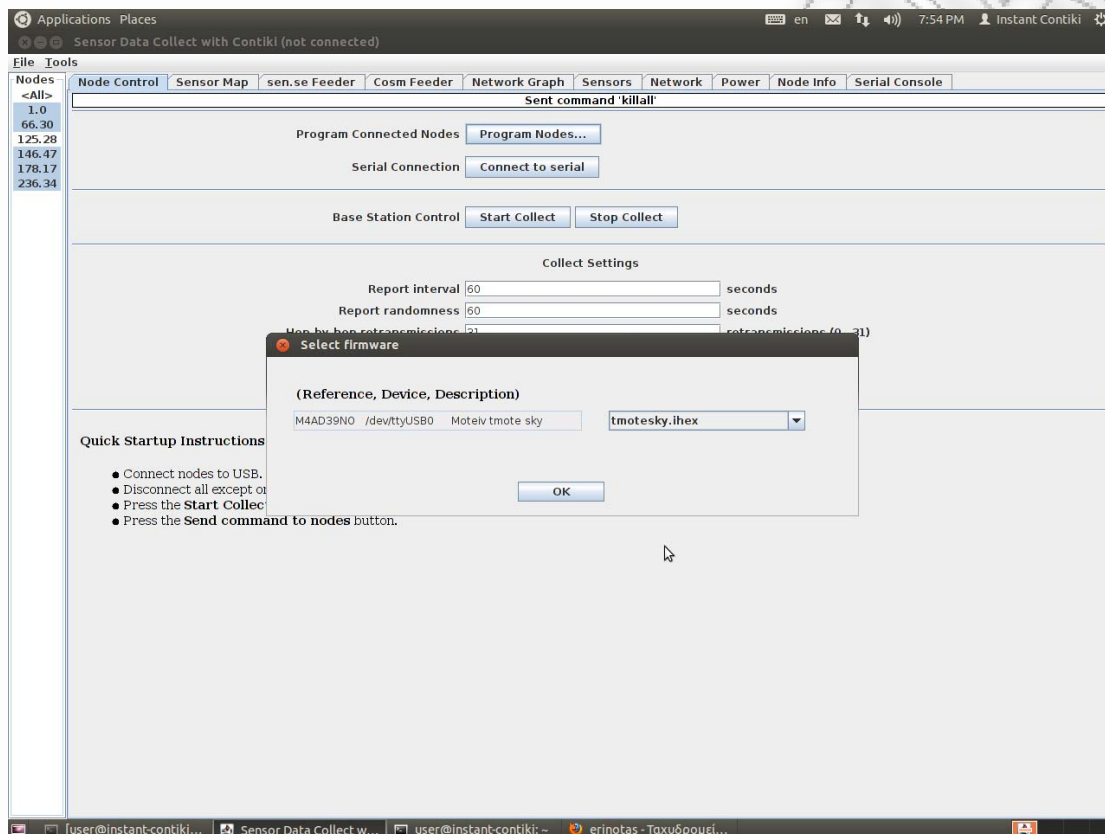
Η εφαρμογή έχει το παρακάτω περιβάλλον. Στην επόμενη ενότητα, παρουσιάζονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα.



Εικόνα 234: Περιβάλλον εφαρμογής Sky-boards-collect

5 Αποτελέσματα

Αρχικά, προγραμματίστηκαν και οι 6 αισθητήρες tmote. Επιλέξαμε το firmware «Tmotesky.ihex».



Εικόνα 245: Επιλογή firmware

Επειδή όμως στο «εικονικό περιβάλλον», είχαμε προβλήματα ώστε να αναγνωρίσουν τα αισθητήρια μέσω των θυρών USB, χρησιμοποιήσαμε τις παρακάτω εντολές για να έχουμε την επικοινωνία των αισθητηρίων με το λειτουργικό μας

```
sudo chmod 0777 /dev/ttyUSB0
```

```
sudo chmod 0777 /dev/ttyUSB1
```

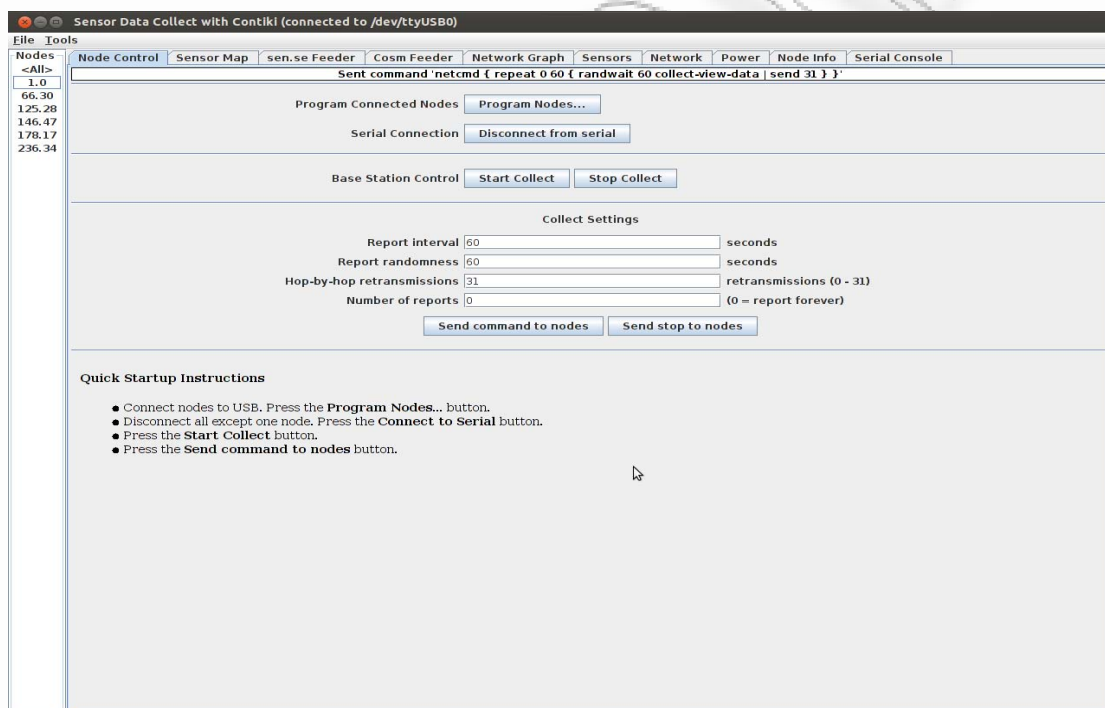
Με την εντολή «Programm nobes» δημιουργούμε μια λίστα με τα στοιχεία των αισθητηρίων.

Μόλις τελειώσει και ο προγραμματισμός του τελευταίου αισθητηρίου, συνδέουμε μόνο ένα αισθητήριο στην θύρα USB, και μέσω της εντολής

«Connect Serial», ώστε να το χρησιμοποιήσουμε σαν το κύριο στοιχείο που θα συλλέγει τα δεδομένα από τα υπόλοιπα αισθητήρια, που έχουμε διασκορπίσει στον χώρο.

Κατόπιν επιλέγουμε την εντολή «Start Collect», ώστε να επικοινωνήσει το αισθητήριο που είναι συνδεδεμένο με τον υπολογιστή μας, με τα υπόλοιπα ώστε να καθορίσει τον χώρο που είναι διασκορπισμένα καθώς και τα εσωτερικά τους στοιχεία.

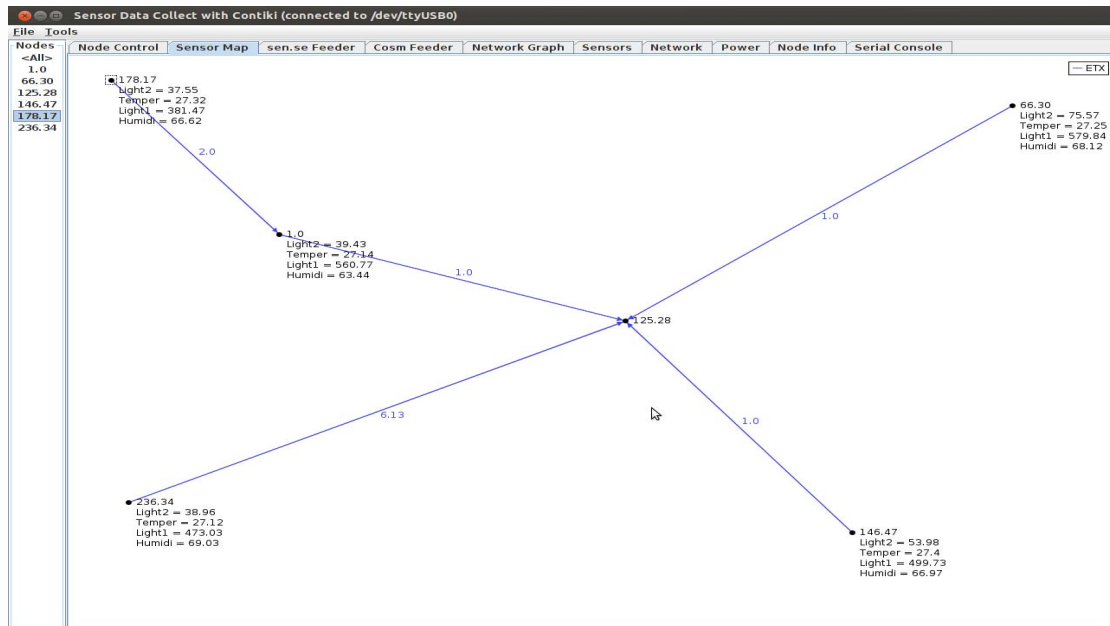
Μόλις ολοκληρωθεί η επικοινωνία, στο πρόγραμμα μας στα αριστερά θα εμφανιστούν τα αισθητήρια τα οποία είναι σε λειτουργία.



Εικόνα 256: Διεπαφή λειτουργίας δικτύου

Κατόπιν με την εντολή «Send Command to nobes», ζητάμε την συλλογή δεδομένων από τα αισθητήρια μας.

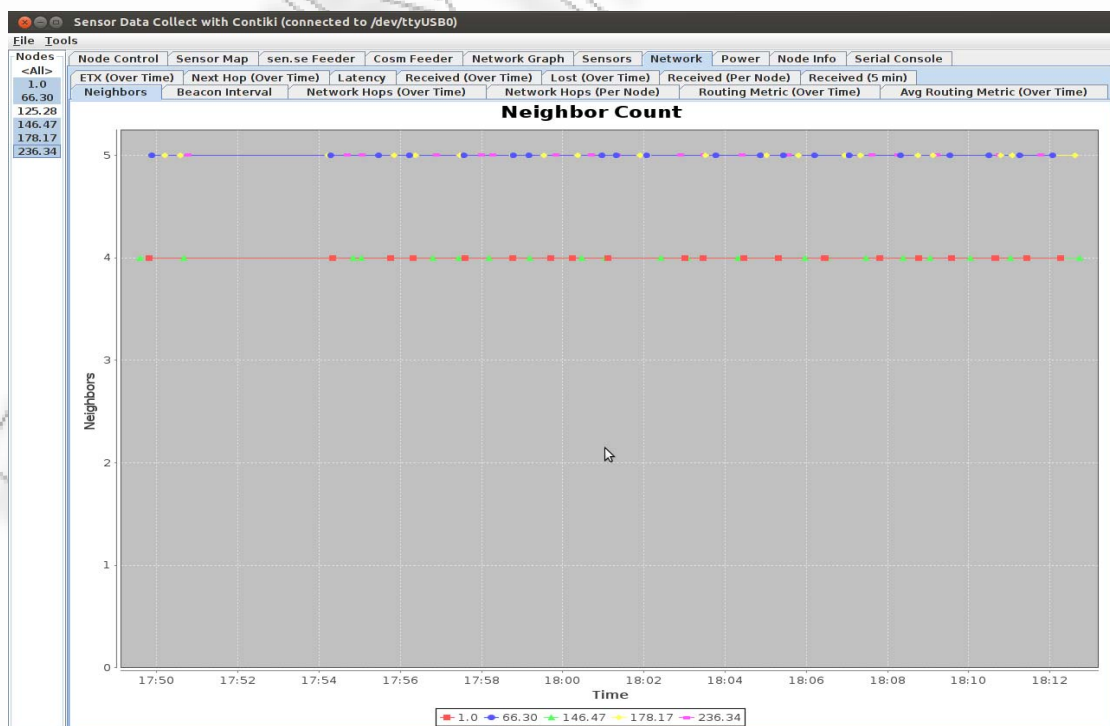
Στην παρακάτω εικόνα εμφανίζεται ο χάρτης των αισθητηρίων όπως έχουν τοποθετηθεί στον χώρο και πως επικοινωνούν μεταξύ τους.



Εικόνα 267: Δομή Δικτύου

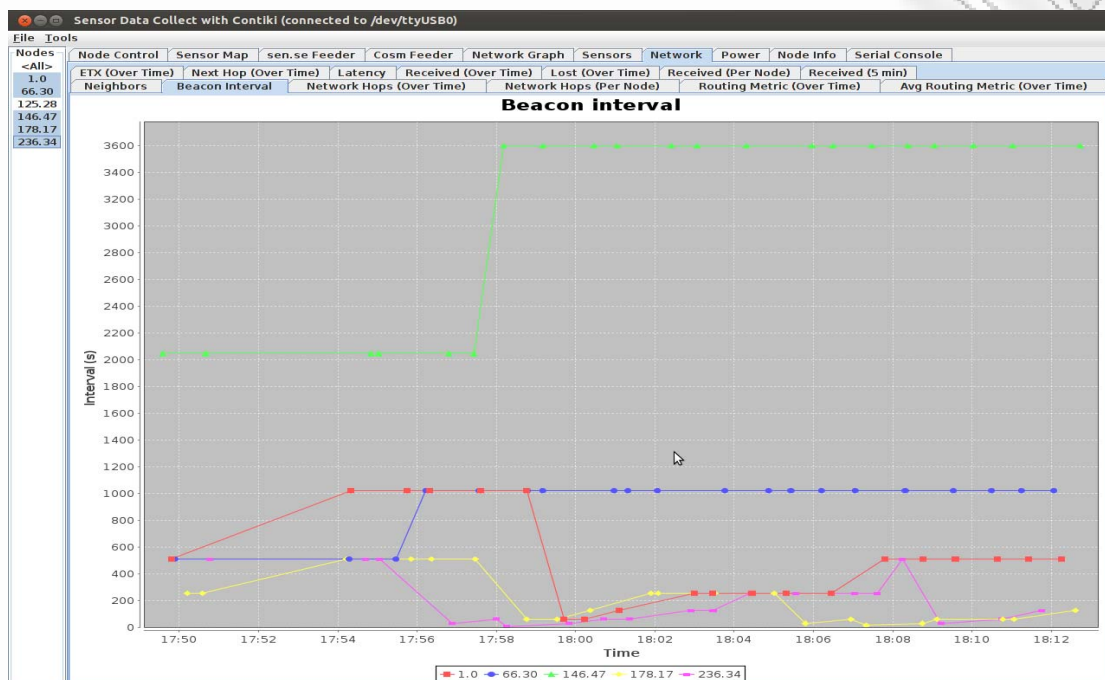
Στην συνέχεια μέσω της διεπαφής «Network» μπορούμε να αναλύσουμε πώς συμπεριφέρονται τα αισθητήρια μεταξύ τους καθώς και τι δεδομένα στέλνουν στο αρχικό αισθητήριο που το χρησιμοποιούμε σαν sink sensor.

Αρχικά βλέπουμε τον αριθμό των γειτονικών κόμβων και όπως δείχνει το γράφημα παρακάτω είναι στο σύνολο πέντε.



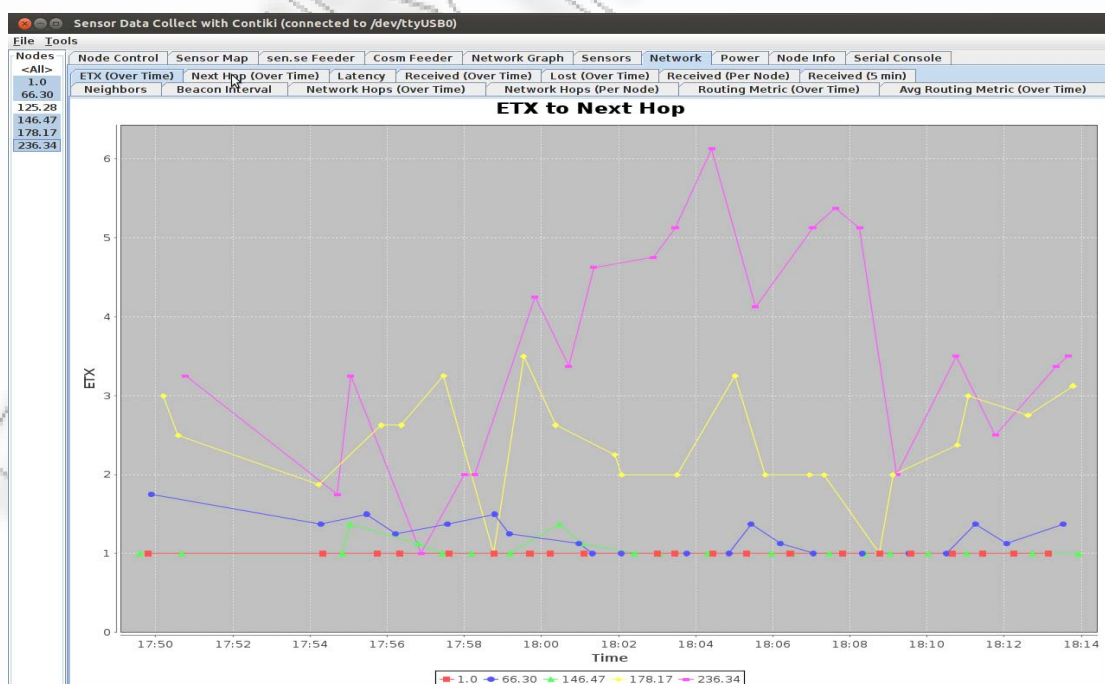
Εικόνα 278: Απεικόνιση αριθμού γειτόνων

Η επόμενη εικόνα δείχνει τα χρονικά διαστήματα που μεσολαβούν σε κάθε beacon μήνυμα, που αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου.

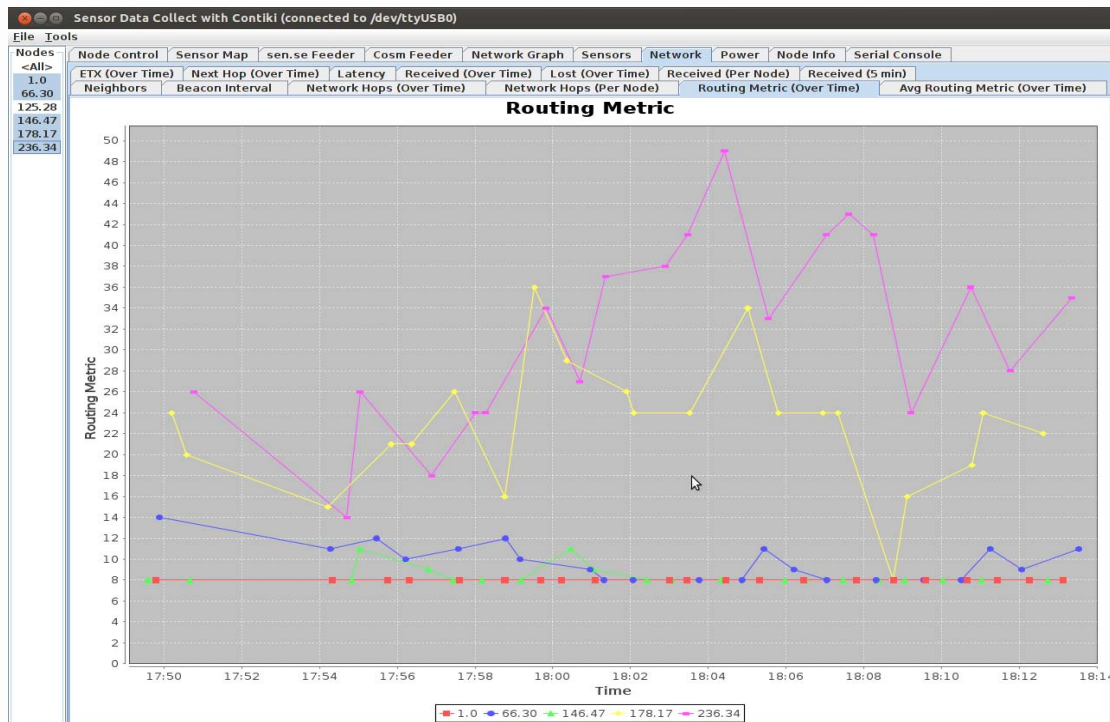


Εικόνα 289: Απεικόνιση χρόνου μεταξύ των beacon μηνυμάτων

Η επόμενη εικόνα δείχνει την τιμή του ETX (expected number of transmissions), το γράφημα του οποίου ακολουθεί ουσιαστικά αυτό του routing metric που υπάρχει ενσωματωμένο στο συγκεκριμένο σύστημα.

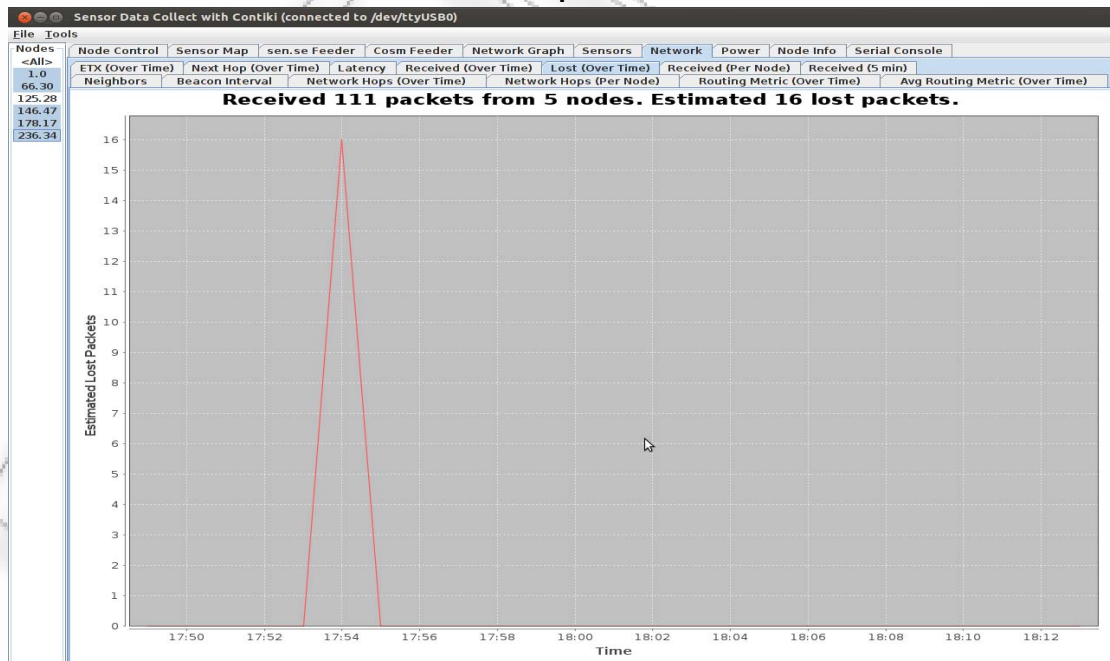


Εικόνα 30: Απεικόνιση του ETX (expected number of transmissions),

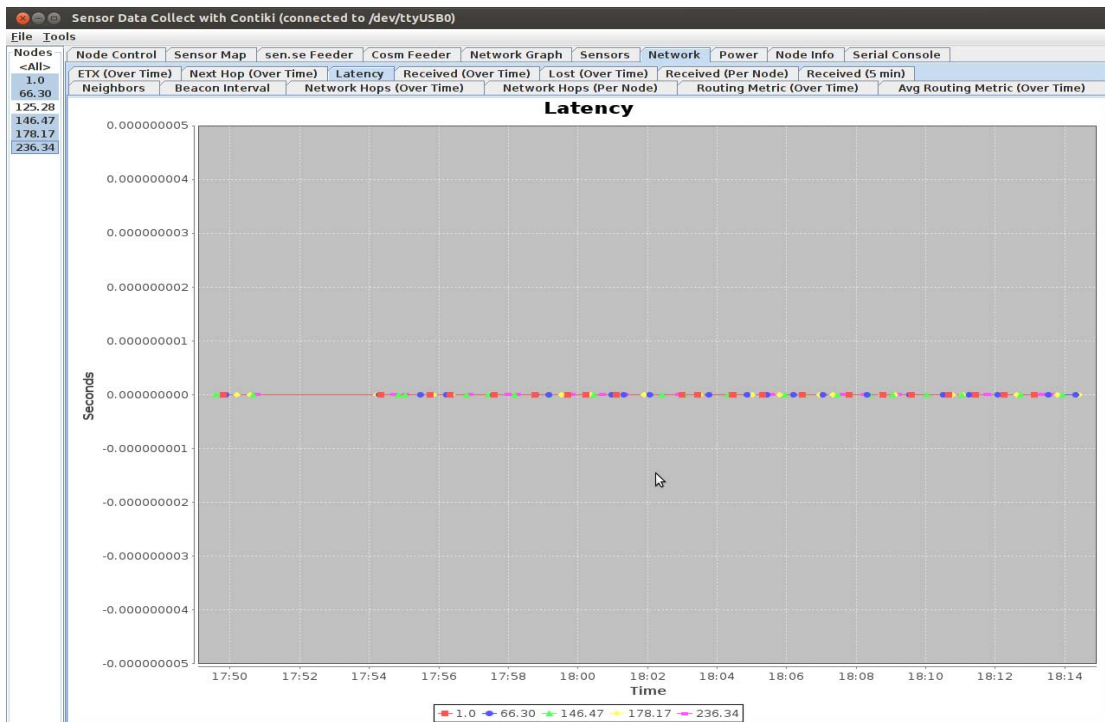


Εικόνα 291: Απεικόνιση του routing metric

Όπως βλέπουμε στις δύο επόμενες εικόνες, δεκαέξι πακέτα έχουν χαθεί, ενώ δεν υπάρχει και καμία καθυστέρηση στο δίκτυο.

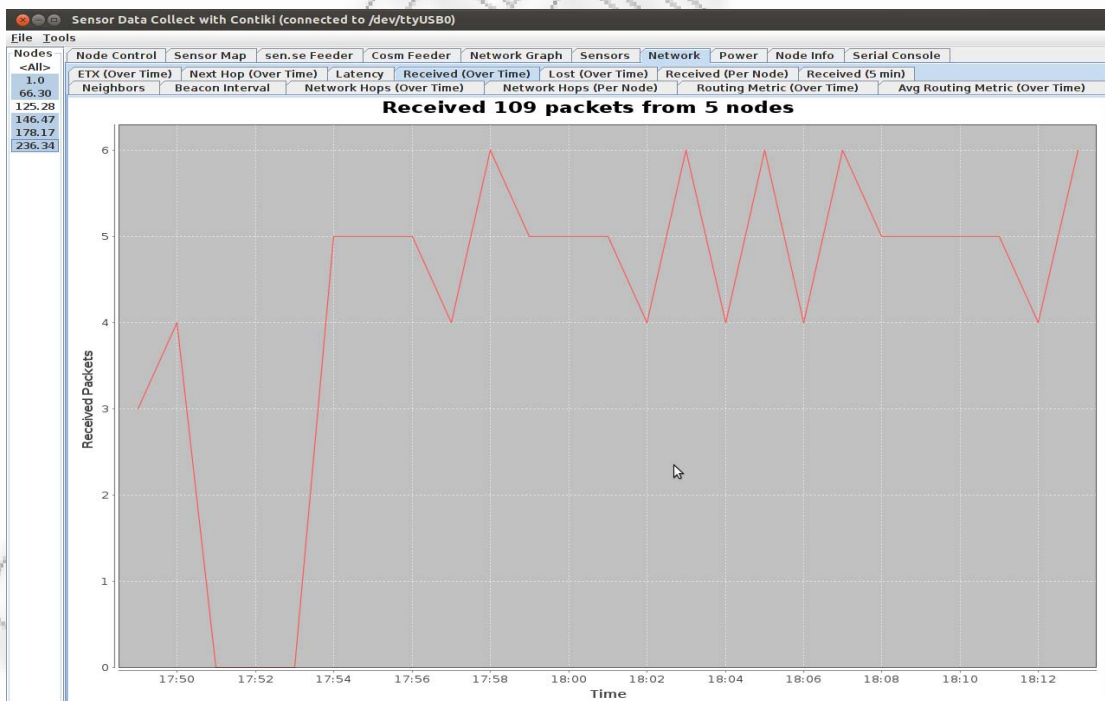


Εικόνα 302: Απεικόνιση χαμένων πακέτων



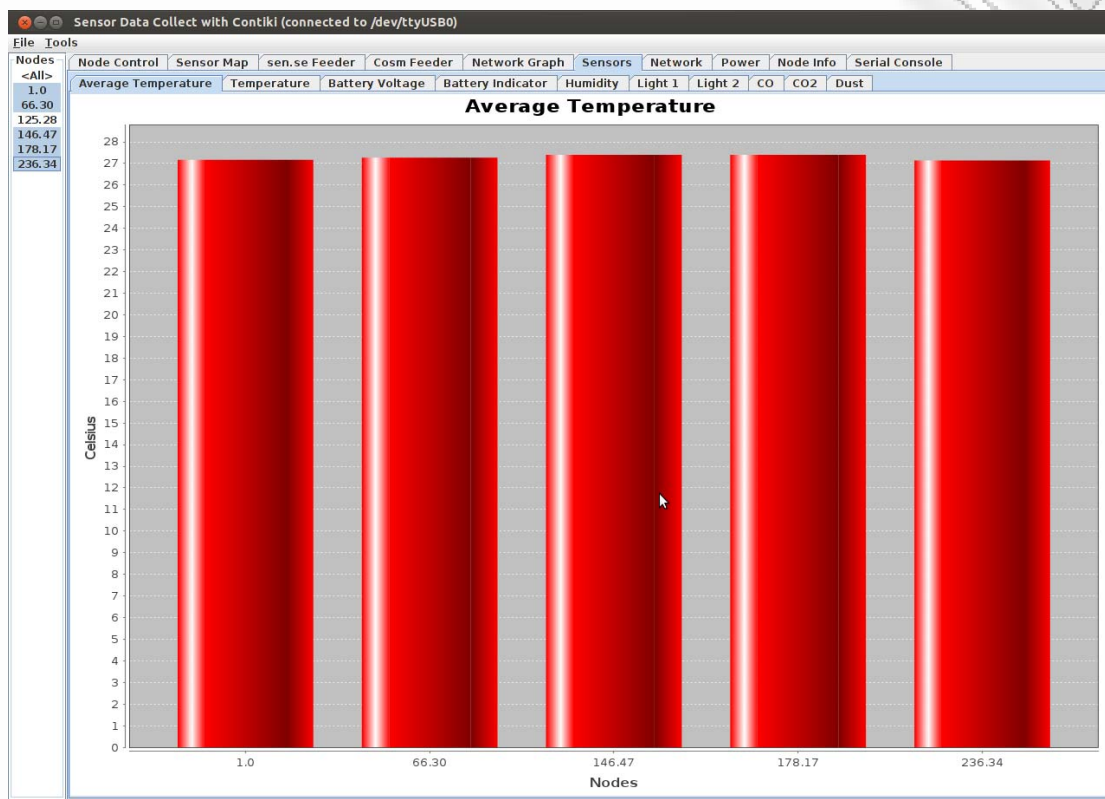
Εικόνα 33: Απεικόνιση καθυστερήσεων

Σύμφωνα με την επόμενη εικόνα, κατά την διάρκεια λειτουργίας του δικτύου έχουν ληφθεί συνολικά εκατόεννιά πακέτα.

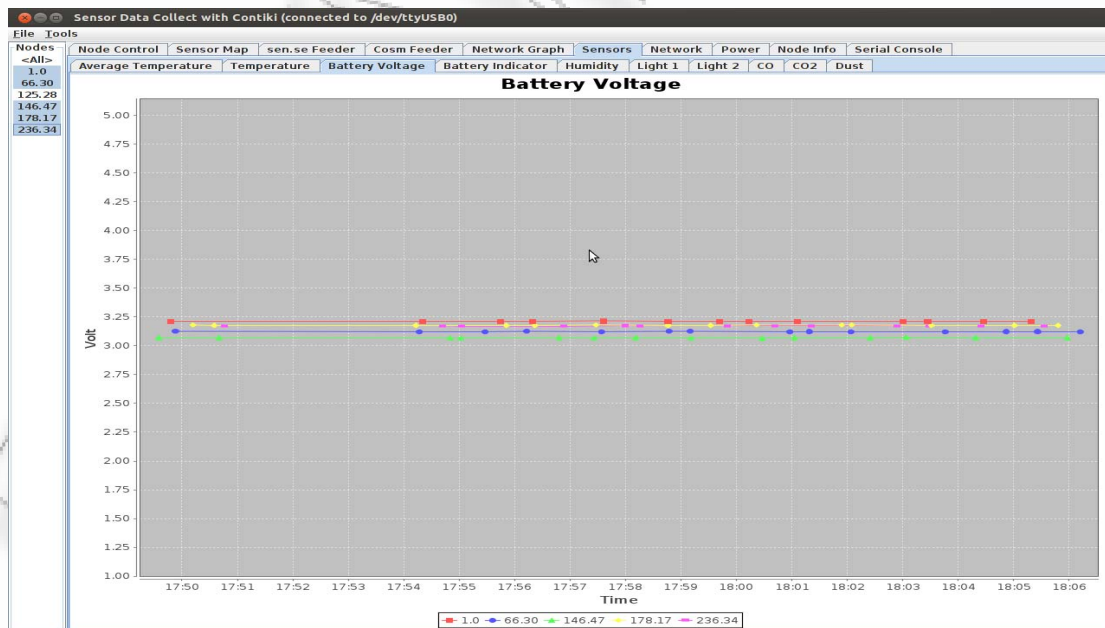


Εικόνα 314: Απεικόνιση αριθμού απεσταλμένων πακέτων

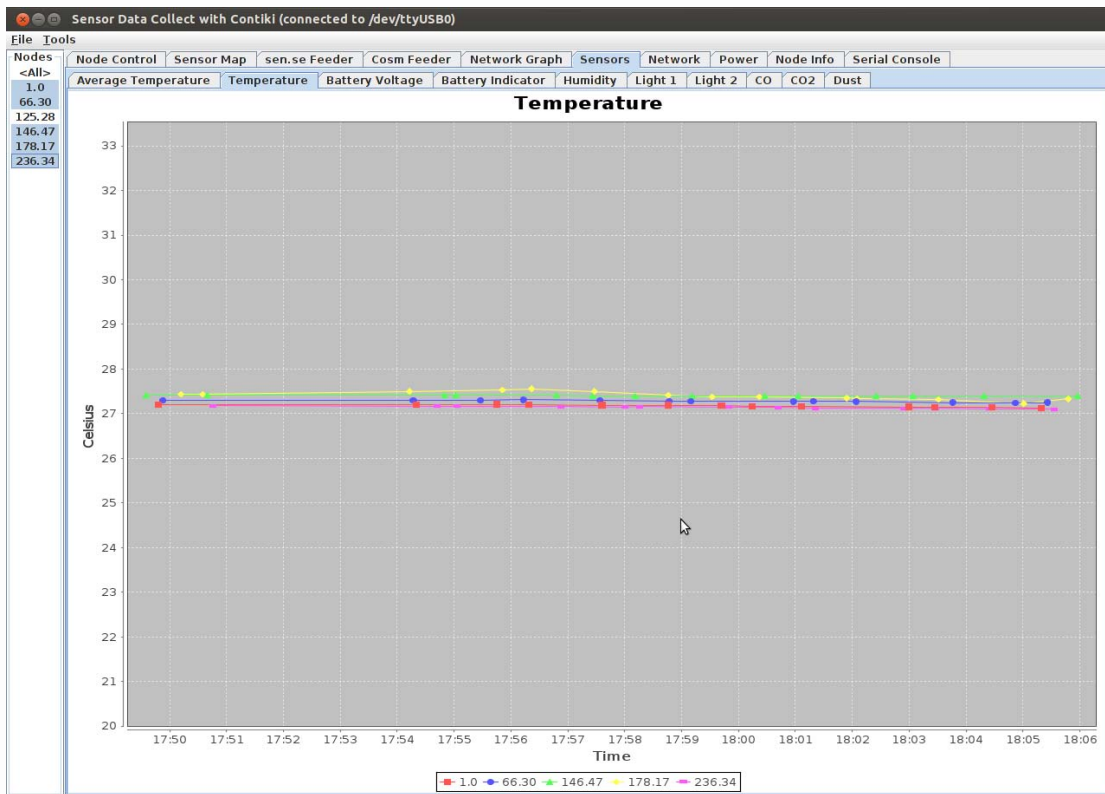
Κατόπιν επιλέγουμε την διεπαφή «Sensors» και βλέπουμε τα στοιχεία που μας στέλνουν τα αισθητήρια μας



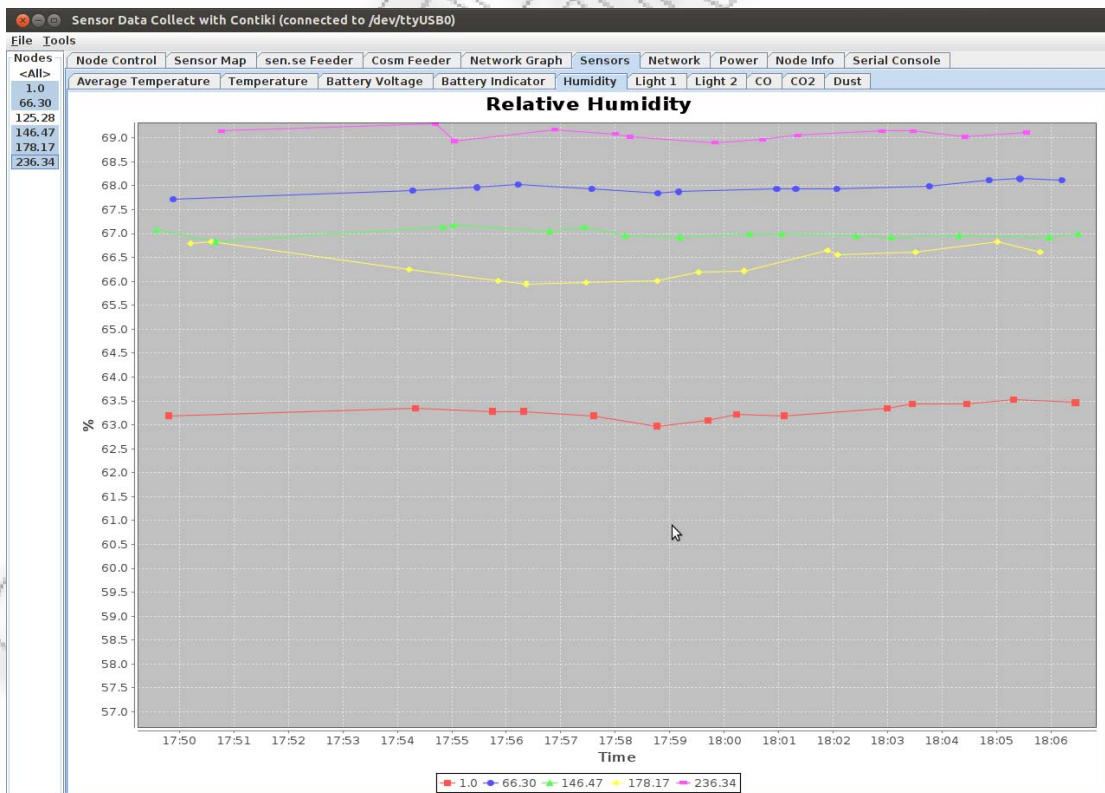
Εικόνα 35: Απεικόνιση θερμοκρασίας ανα αισθητήριο



Εικόνα 326: Απεικόνιση επιπέδου μπαταρίας των αισθητήριων

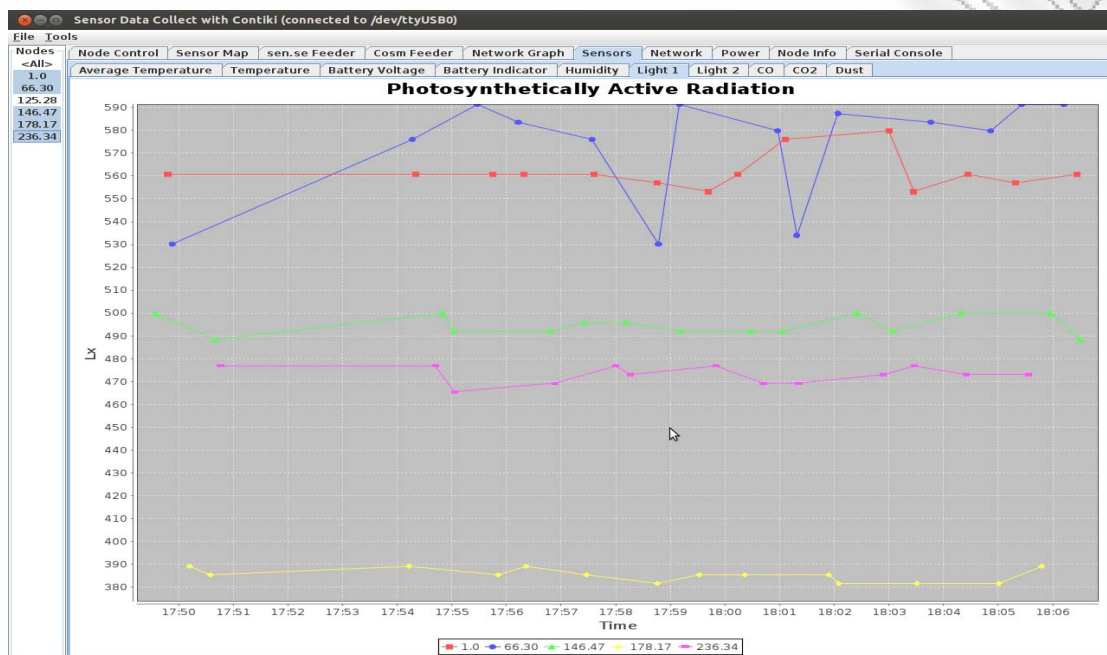


Εικόνα 337: Απεικόνιση θερμοκρασίας

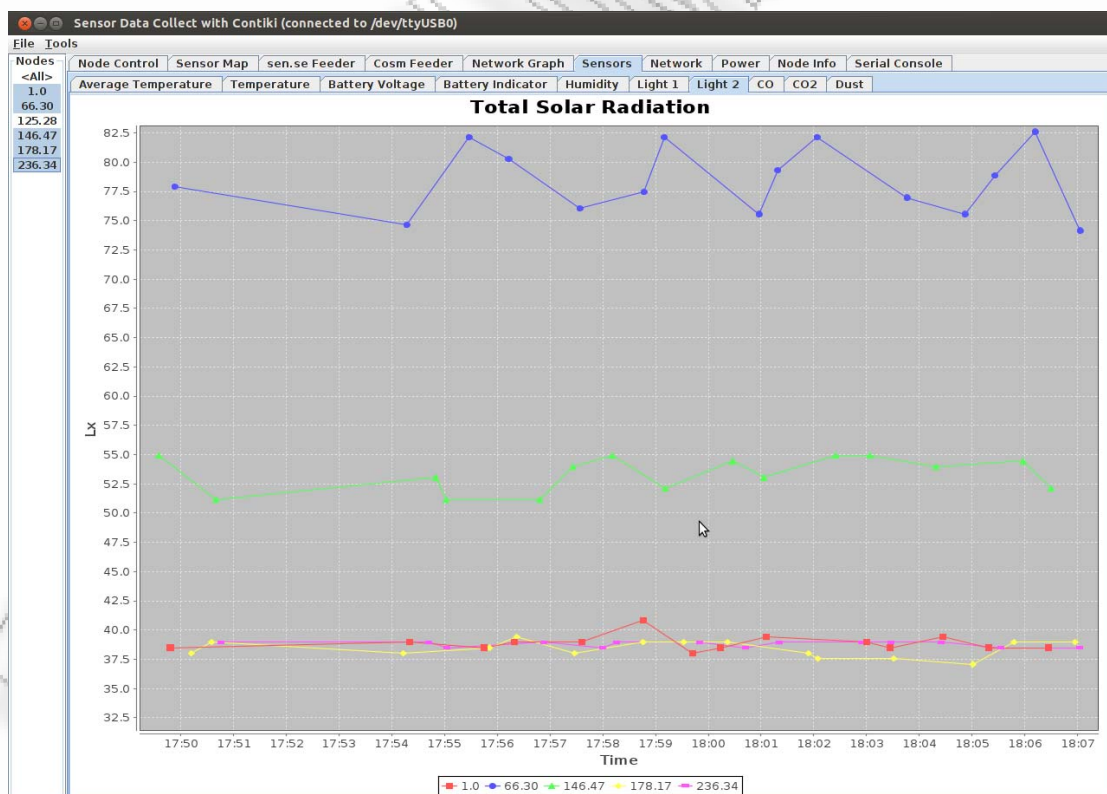


Εικόνα 38: Απεικόνιση υγρασίας

Οι τιμές από τους δύο αισθητήρες φωτός, φαίνονται στα δύο επόμενα γραφήματα.

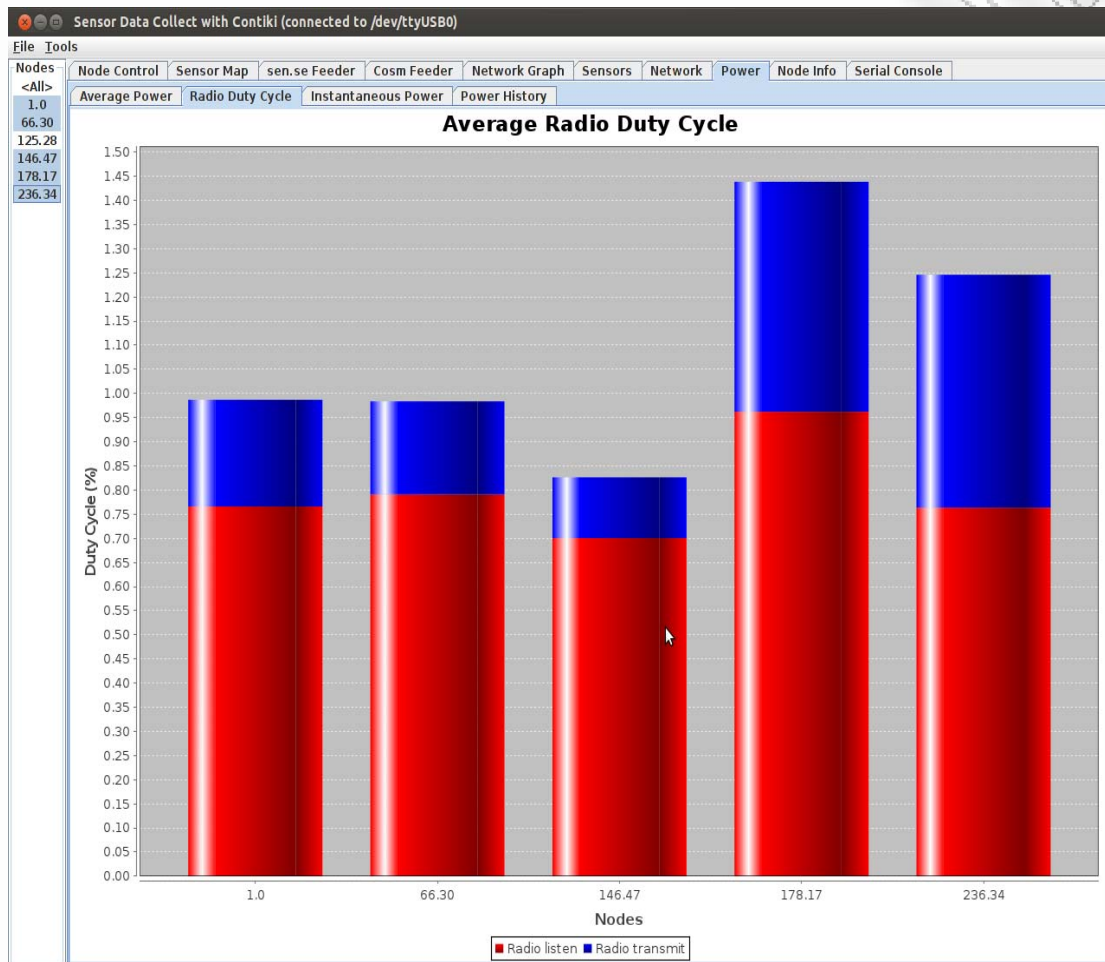


Εικόνα 349: Απεικόνιση επιπέδου φωτός – αισθητήρας 1



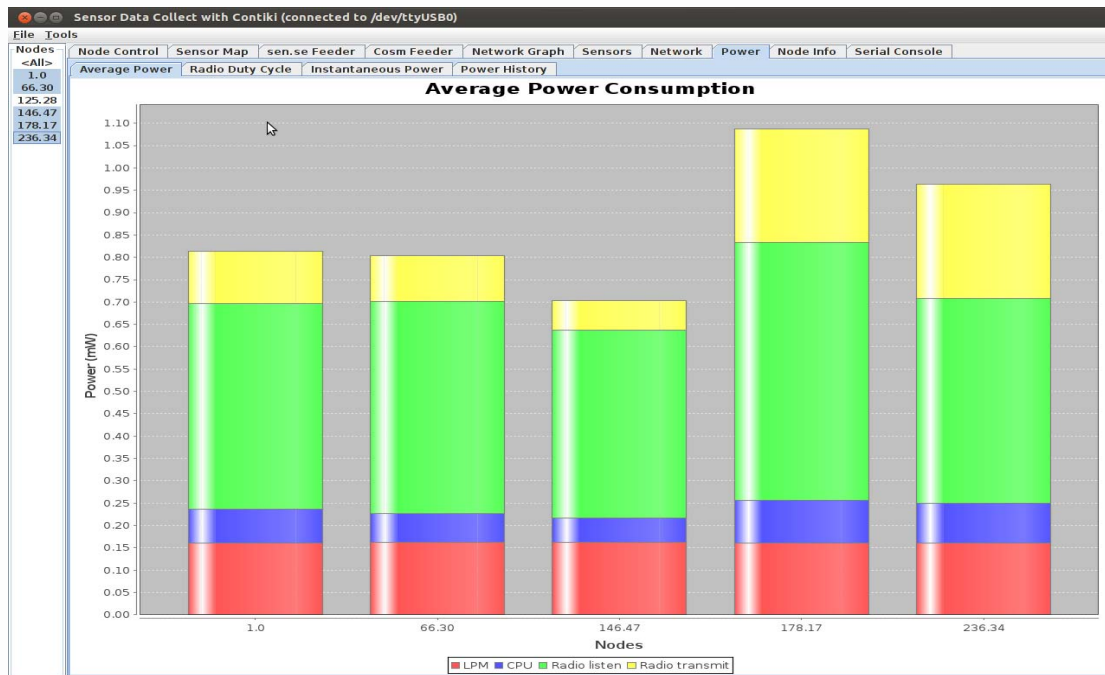
Εικόνα 40: Απεικόνιση επιπέδου φωτός – αισθητήρας 2

Στην επόμενη εικόνα ακολουθεί γράφημα που περιγράφει την λειτουργία των αισθητήρων με βάση το duty cycle.



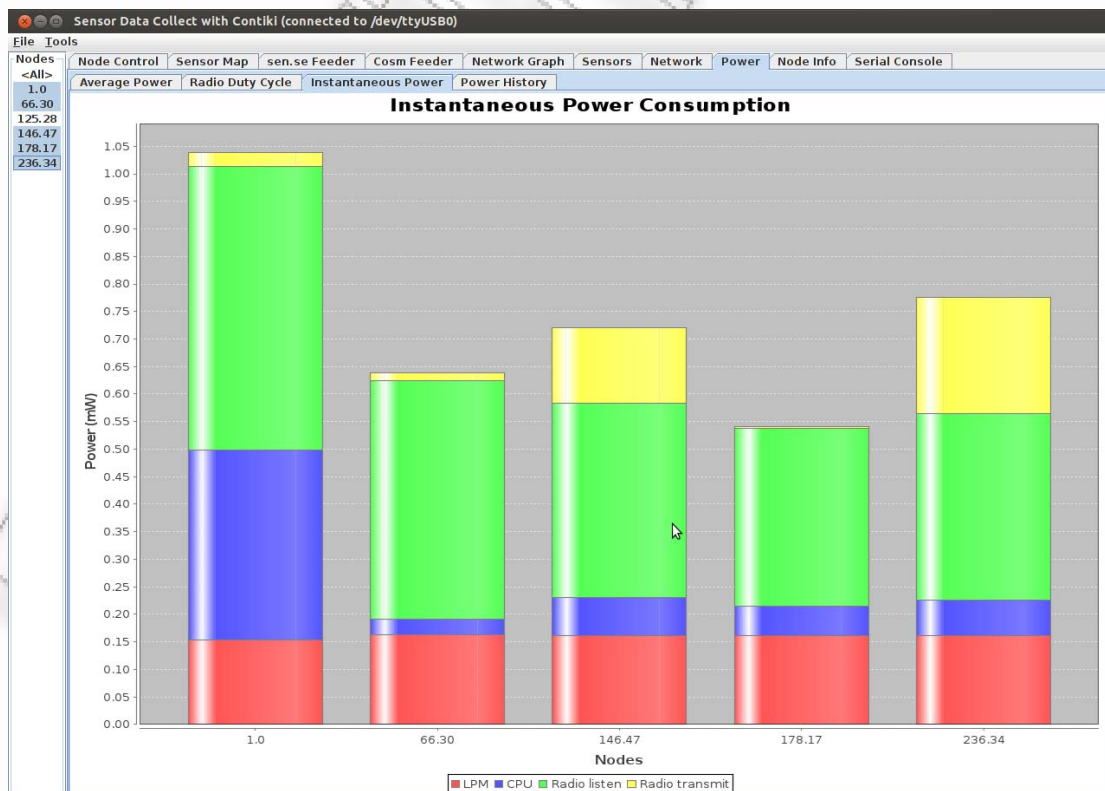
Εικόνα 41: Duty cycle αισθητήρα

Στα επόμενα γραφήματα παρουσιάζονται δεδομένα σχετικά με την κατανάλωση ισχύος του κόμβου. Η πρώτη εικόνα δείχνει την μέση κατανάλωση, αναλυτικά για την μετάδοση δεδομένων, την παρακολούθηση του διαύλου, τον επεξεργαστή και για το σύστημα LPM (local positioning system). Το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος, όπως φαίνεται, καταναλώνεται για την παρακολούθηση του διαύλου.

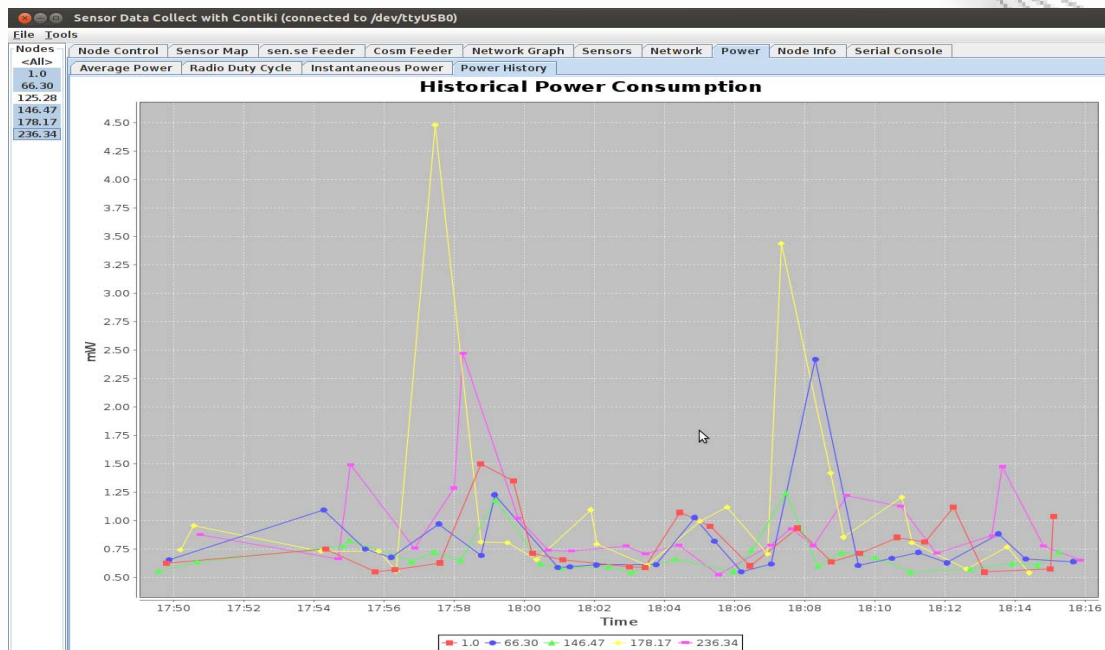


Εικόνα 42: Αναλυτική μέση κατανάλωση ισχύος αισθητήρα

Κατ' αντιστοιχία, η επόμενη εικόνα δείχνει την κατανάλωση ισχύος μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ενώ ακολουθεί γράφημα με την συνολική κατανάλωση ισχύος συναρτήσει του χρόνου.



Εικόνα 43: Αναλυτική στιγμιαία κατανάλωση ισχύος αισθητήρα



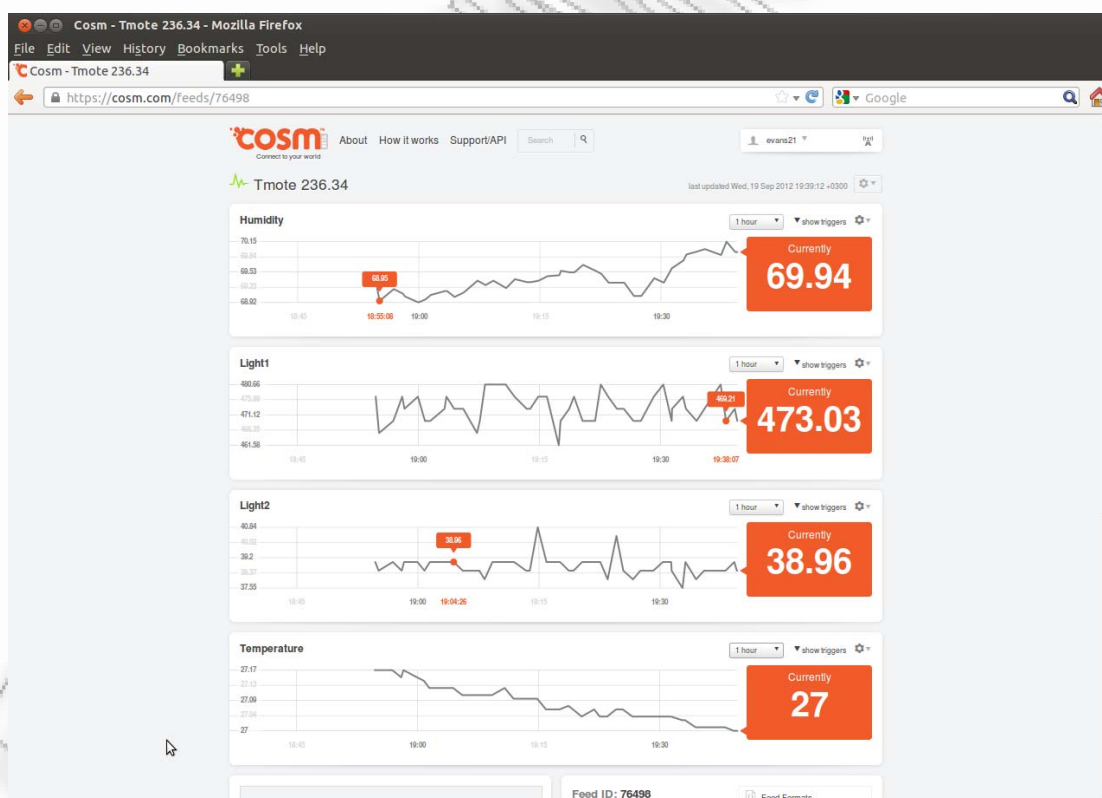
Εικόνα 44: Συνολική κατανάλωση ισχύος αισθητήρα

Στην διεπαφή «Cosm Feeder» μπορούμε να προωθήσουμε τα δεδομένα που έχουμε από τα αισθητήριά μας στην ιστοσελίδα www.cosm.com, που θα την χρησιμοποιήσουμε σαν web client ώστε να παρακολουθούμε τις μετρήσεις απομακρυσμένα.

Εικόνα 45: Διεπαφή Cosm Feed

Αρχικά έχουμε δημιουργήσει ένα λογαριασμό στο www.cosm.com, μετά την ενεργοποίηση του λογαριασμού. Αρχίζουμε και δημιουργούμε datasheets αναλόγως με τα πόσα αισθητήρια θέλουμε να προωθήσουμε τα δεδομένα τους. Για την παρούσα άσκηση δημιουργήσαμε πέντε. Κατόπιν για κάθε datasheet δημιουργούμε το αντίστοιχο κλειδί, το οποίο θα μας βοηθήσει στην ταξινόμηση των δεδομένων μέσω της εφαρμογής.

Στην διεπαφή «Cosm feed» επιλέγουμε το αισθητήριο το οποίο θέλουμε να συνδέσουμε με το αντίστοιχο datasheet. Κατόπιν εισάγουμε στις φόρμες το κλειδί, το όνομα καθώς και το Id feed του φύλλου που θα αποθηκευτούν τα δεδομένα. Επιλέγουμε την εντολή set, ώστε να το αποθηκεύσουμε στην βάση δεδομένων για μελλοντική χρήση. Στην συνέχεια επιλέγουμε την επιλογή convert, ώστε τα δεδομένα μας να στέλλονται σε τρέχουσες τιμές. Και τέλος με την εντολή Start Feeding, γίνεται η προώθηση των δεδομένων.



Εικόνα 46: Αποτελέσματα στην σελίδα Cosm.com

6 Επίλογος

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks-WSN) αποτελούνται από χωρικά καταμεμημένους αυτόνομους αισθητήρες με καθήκον την παρακολούθηση διάφορων συνθηκών. Σήμερα, τα WSN χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές βιομηχανικές και καταναλωτικές εφαρμογές. Ειδικά στην επιστήμη υπολογιστών και στις τηλεπικοινωνίες, αποτελούν έναν ενεργό τομέα έρευνας με μεγάλη δραστηριότητα. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μελέτη της ασύρματης μετάδοσης περιβαλλοντικών δεδομένων από ένα τέτοιο δίκτυο προς ένα κέντρο συλλογής, η περαιτέρω επεξεργασία, αποθήκευση και τελικά απεικόνιση τους σε μορφή φιλική προς το χρήστη και ευνοϊκή για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα μεγέθη τα οποία μετρούνται είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η ολική ηλιακή ακτινοβολία, η ενεργή φωτοσυνθετικά ακτινοβολία και η εσωτερική τάση και θερμοκρασία της μονάδας-αισθητήρα.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, αρχικά πραγματοποιήθηκε μια σύντομη μελέτη πάνω στον κόμβο-αισθητήρα και τα συστατικά του μέρη, η οποία στη συνέχεια επεκτείνεται στο δίκτυο αισθητήρων. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, έπειτα από σύντομη αναφορά των εφαρμογών αυτών στη σύγχρονη εποχή, έγινε μια ανάλυση της επικοινωνίας και της κατανάλωσης ενέργειας σε τέτοια δίκτυα, όπως και των τεχνικών προκλήσεων και απαιτήσεων τους.

Εν συνεχεία, γίνεται παρουσίαση της πλατφόρμας Tmote Sky της εταιρείας Moteiv, η οποία και αποτέλεσε τη μονάδα που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του ασύρματου δικτύου της εργασίας. Αυτό περιελάμβανε την περιγραφή των συστατικών και χαρακτηριστικών, αλλά και τον τρόπο μετατροπής των τιμών που λαμβάνονται σε μορφή σύμφωνη με το διεθνές σύστημα μονάδων SI.

Για τη διαχείριση των πλατφορμών χρησιμοποιήθηκε το λειτουργικό TinyOS που χρησιμοποιεί τη γλώσσα προγραμματισμού NesC, η οποία βασίζεται πάνω στη C.

Στην εφαρμογή που υλοποιήθηκε, δημιουργήθηκε ένα δίκτυο με τους έξι διαθέσιμους κόμβους – αισθητήρες, και πραγματοποιήθηκε καταγραφή όλων των διαθέσιμων μετρήσεων και δεδομένων δικτύου, καθώς και μετάδοση των δεδομένων στο διαδίκτυο.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΑΙΑ

Βιβλιογραφία

1. “Simulating the Power Consumption of LargeScale Sensor Network Applications”, V. Schnayder, M. Hempstead, B. Chen, G.W. Allen, M. Welsh, Harvard University, Sensys '04, Nov 3-5, 2004
2. “Accurate Prediction of Power Consumption in Sensor Networks”, O. Landsiedel, K. Wehrle, S. Gotz, Protocol Engineering and Distributed Systems Group, University of Tuebingen, Germany, IEEE EmNetS-II, 2005
3. “Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring”, A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson. WSNA '02, Sept 28, 2002, Atlanta, Georgia, USA
4. M. Bhardwaj, T. Garnett, A.P. Chandrakasan, Upper bounds on the lifetime of sensor networks, IEEE International Conference on Communications ICC'01, Helsinki, Finland, June 2001.
5. N. Noury, T. Herve, V. Rialle, G. Virone, E. Mercier, G. Morey, A. Moro, T. Porcheron, Monitoring behavior in home using a smart fall sensor, IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology, October 2000, pp. 607–610.
6. “Micro Power Meter for Energy Monitoring of Wireless Sensor Networks at Scale”, X. Jiang, P. Dutta, D. Culler, I. Stoica, Dept. of Computer Science, University of California, Berkeley. IPSN '07, April 25-27, 2007
7. “Software-based On-line Energy Estimation for Sensor Nodes”, A. Dunkels, F. Osterlind, N. Tsiftes, Z. He, Swedish Institute of Computer Science. EmNets '07, June 25-26, 2007, Cork, Ireland
8. “Analysis of Energy Consumption for Ad Hoc Wireless Sensor Networks Using a Bit-Meter-per-Joule Metric”, J. L. Gao, IPN Progress Report 42-150, Aug 15, 2002
9. F. Zhao, L. Guibas, “Wireless Sensor Networks, First Edition: An Information Processing Approach”, Morgan Kaufmann, 2004.

10. G. Pottie, L. Clareb, "Wireless integrated network sensors: toward low-cost and robust self-organizing security networks", Proc. SPIE, Sensors, C3I, Vol. 3577, p. 86-95, 1999.
11. D. Estrin, D. Culler, K. Pister, and G. Sukhatme, "Connecting the Physical World with Pervasive Networks", IEEE Pervasive Computing, pp. 59-69, January-March 2002.
12. Z. Hu, B. Li, "On the Fundamental Capacity and Lifetime Limits of Energy-Constrained Wireless Sensor Networks", Proceedings of the 10th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, pp.2-9, 25-28 May, Toronto, Canada, 2004.
13. Γ. Μαζαράκης, Διδακτορική Διατριβή ' Τεχνικές Χαμηλής Κατανάλωσης Ενέργειας για Ανίχνευση Προσώπων και Κατηγοριοποίηση Οχημάτων στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων', Ε.Μ.Π, Αθήνα, Οκτώβριος 2007.
14. F. Zhao et al., "Collaborative signal and information processing: an information directed approach", Proc. IEEE, 91(8), 1199–1209, 2003.
15. G. Gupta and M. Younis, "Load-balanced clustering of wireless sensor networks", IEEE ICC 2003, 3, 1848–1852, May 2003.
16. S. Bandyopadhyay and E.J. Coyle, "An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks", IEEE INFOCOM 2003, 3, 1713–1723, San Francisco, March–April 2003.
17. http://www.sensirion.com/en/01_humidity_sensors/02_humidity_sensor_sh t11.htm
18. http://jp.hamamatsu.com/resources/products/ssd/pdf/s1087_etc_kspd1039 e01.pdf
19. http://docs.TinyOS.net/tinywiki/index.php/Boomerang_ADC_Example
20. Tmote Sky Datasheet [pdf]